



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VLIV KONTAMINACE A DEGRADACE MAZIVA NA  
CHOVÁNÍ MAZACÍHO FILMU**

THE EFFECT OF LUBRICANT CONTAMINATION AND DEGRADATION ON LUBRICATING FILM BEHAVIOR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Strnad**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Milan Omasta, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Jan Strnad**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Vliv kontaminace a degradace maziva na chování mazacího filmu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Hlavní příčinou neočekávaného selhání tribologických uzlů, zejména převodů, je ztráta funkce mazacího systému způsobená kontaminací a degradací maziva. Proto jsou mazací systémy často vybaveny prvky pro diagnostiku stavu maziva. Pro stanovení přípustné míry kontaminace a degradace je nutné popsat a pochopit, jak tyto faktory ovlivňují chování mazacího filmu, zejména jeho tloušťku v kontaktu a tření. Výsledky práce budou využity při vývoji proaktivně řízeného systému mazání.

Typ práce: výzkumná

Projekt: MPO

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je stanovit vliv různých druhů kontaminantů maziva a jeho degradace na utváření mazacího filmu za různých provozních podmínek, zejména s ohledem na limity únosnosti filmu. Použit bude optický tribometr a tribometr pro měření tření.

Dílčí cíle diplomové práce:

- prostudovat dostupné literární zdroje a navrhnout plán experimentů,
- realizovat a vyhodnotit sérii experimentů,
- stanovit vliv míry kontaminace a degradace s ohledem na mazací film,
- připravit publikaci výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 0123970474

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



---

## ABSTRAKT

Kontaminace a degradace maziva je jednou z hlavních příčin neočekávaného selhání tribologických uzlů. V důsledku toho se v praxi zavádí různé úrovně údržby, které vedou k prodloužení životnosti mazaného uzlu. Tyto systémy často obsahují sofistikované on-line diagnostické nástroje, které slouží k vyhodnocování vzorku maziva pomocí jistých veličin, jako je viskozita, počet částic, vlhkost, dielektrická konstanta apod. Na základě jejich změny může takovýto systém činit nápravná opatření, spočívající např. ve filtraci či výměně maziva. Snahou této experimentální diplomové práce je tudíž stanovit vliv kontaminace (pevnými částicemi, vlhkostí) a degradace (oxidační) maziva na chování mazacího filmu s ohledem na jeho limitní únosnost. Pro zkoumání tloušťky mazacího filmu, tření a opotřebení bylo využito optického a MTM tribometru v konfiguraci *ball-on-disc*.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Kontaminace, pevné částice, vlhkost, degradace, tloušťka mazacího filmu, viskozita, tření, opotřebení

## ABSTRACT

Lubrication contamination and degradation is one of the major causes of unexpected failure of tribological nodes. As a result, different levels of maintenance are introduced in practice, leading to a longer service life of the lubricated node. These systems often include sophisticated on-line diagnostic tools that can be used to evaluate a sample of a lubricant using certain variables such as viscosity, number of particles, humidity, dielectric constant, etc. Based on changes of these variables some systems can make corrective measures such as filtering or complete replacement of lubricant. Therefore, the aim of this experimental thesis is to determine the influence of lubrication contamination (solid particles, moisture) and degradation (oxidation) on the lubricating film behavior with respect to its limit bearing capacity. To examine the thickness of the lubricating film, friction and wear, an optical and MTM tribometer, in the *ball-on-disc* configuration, was used.

## KEY WORDS

Contamination, solid particles, humidity, degradation, thickness of lubricant film, viscosity, friction, wear



---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRNAD, J. *Vliv kontaminace a degradace maziva na chování mazacího filmu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.



---

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Milanu Omastovi, Ph.D. za mnoho cenných rad a připomínek při řešení této diplomové práce. Dále děkuji svým rodičům, přítelkyni a známým za podporu po celou dobu studia.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, že jsem ji zpracoval samostatně pod vedením Ing. Milana Omasty, Ph.D. a že jsem v seznamu zdrojů uvedl všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 17. května 2018

.....

Bc. Jan Strnad

# OBSAH

<b>1 Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2 Přehled současného stavu poznání</b>	<b>12</b>
2.1 Kontaminace pevnými částicemi . . . . .	12
2.2 Kontaminace vlhkostí . . . . .	18
2.3 Degradace maziva . . . . .	20
<b>3 Analýza problému a cíl práce</b>	<b>25</b>
3.1 Analýza problému . . . . .	25
3.2 Cíle práce . . . . .	26
<b>4 Materiály a metody</b>	<b>27</b>
4.1 Metody a zařízení . . . . .	27
4.2 Materiály a příprava vzorků . . . . .	31
4.3 Postup měření a hodnocení výsledků . . . . .	33
<b>5 Výsledky</b>	<b>37</b>
5.1 Vliv pevných částic na tření a opotřebení . . . . .	37
5.2 Vliv obsahu vody v oleji na chování mazacího filmu . . . . .	44
5.3 Vliv oxidační degradace maziva na stav a chování mazacího filmu . . . . .	47
<b>6 Diskuze</b>	<b>53</b>
6.1 Vliv míry pevných částic na tření a opotřebení . . . . .	53
6.2 Vliv míry vlhkosti na parametry mazacího filmu . . . . .	55
6.3 Vliv míry oxidační degradace na chování mazacího filmu . . . . .	56
<b>7 Závěr</b>	<b>59</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>61</b>
<b>Seznam obrázků a grafů</b>	<b>65</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>69</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>70</b>

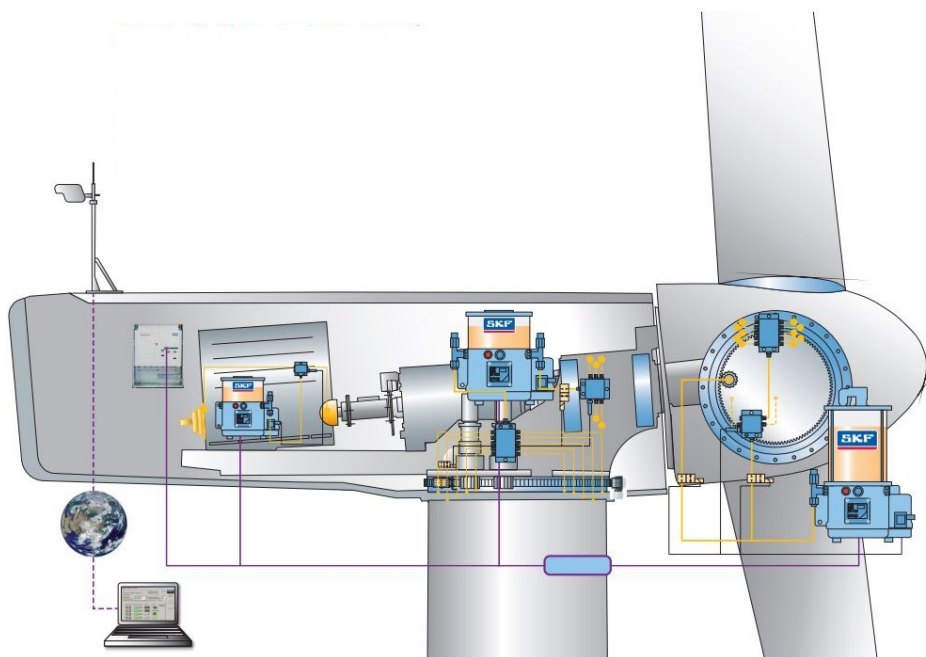
# 1 ÚVOD

Mazání je jednou ze základních metod umožňujících snížit tření a opotřebení v kontaktech strojních součástí, čímž dochází k prodloužení životnosti strojních sestav. Obecně je na kvalitu mazacího filmu kladen velký důraz, neboť je snahou docílit co nejdelšího bezporuchového chodu stroje. Důležitým faktorem ovlivňujícím životnost stroje je míra kontaminace a degradace maziva [1], které mohou zapříčinit ztrátu funkce mazacího filmu a následné selhání tribologického uzlu. Za účelem odstranění těchto nežádoucích vlivů se zavedly různé úrovně údržby.

Nejvýznamnější z nich je proaktivní přístup, který funguje na principu vyhodnocování pravidelně odebíraného vzorku maziva. V případě, že výsledky poukazují na nevyhovující stav maziva, jsou přijata nápravná opatření, spočívající např. ve výměně maziva nebo v jeho důkladném čištění (filtraci). V současné době je cílem tyto systémy automatizovat a užívat v nich sofistikované on-line diagnostické nástroje, jako jsou senzory fungující na principu vyhodnocování teploty, dielektrické konstanty, obsahu vody v oleji, počtu částic v kontaktu, elektrické vodivosti, kyselosti a mnoha dalších parametrů.

Nezbytným předpokladem pro vývoj automatických proaktivních systémů je dosud chybějící komplexní znalost chování mazacího filmu při různých typech kontaminace a degradace maziva, např. částicové, oxidační apod. Na základě těchto poznatků lze získat predikční vztahy pro řízení proaktivních zásahů, které umožní maximální možné prodloužení životnosti stroje (Obrázek 1.1).

Tato práce se tudíž bude zabývat experimentálním výzkumem vlivu, který mají různé druhy kontaminantů maziva na utváření mazacího filmu za různých provozních podmínek, a to zejména s ohledem na limity únosnosti mazacího filmu. Tyto výsledky budou vztaženy především k reálně diagnostikovatelným veličinám.



Obr. 1.1 Ukázka tribologických uzlů (označených žlutě) u větrných elektráren [1].

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Zatímco počátky výzkumu mazacích filmů jsou známé, studie vlivu kontaminace a degradace maziva na chování mazacího filmu nelze jednoduše časově zařadit. Lze usuzovat, že prvotní zájem o tuto problematiku projevil již O. Reynolds při pozorování mazacích filmů. Ovšem první doposud zaznamenané výzkumy pochází z první poloviny 20. století. Ty popisují zejména závislost kontaminace a degradace maziva na jeho viskozitě, nikoliv však na tloušťce mazacího filmu. Snahou je tudíž najít závislost a empirické vztahy, které by popisovaly degradační procesy v mazivu, čímž by se dal predikovat aktuální stav maziva. To by vedlo k značnému prodloužení životnosti maziv a k následnému snížení nákladů potřebných pro jejich výměnu. Obecně lze kontaminaci a degradaci rozdělit na:

- *kontaminaci pevnými částicemi* 2.1,
- *kontaminaci vlhkostí* 2.2,
- *degradaci maziva* 2.3.

Negativní vlivy ovlivňující mazací film je možné pozorovat pomocí různých diagnostických přístupů.

### 2.1 Kontaminace pevnými částicemi

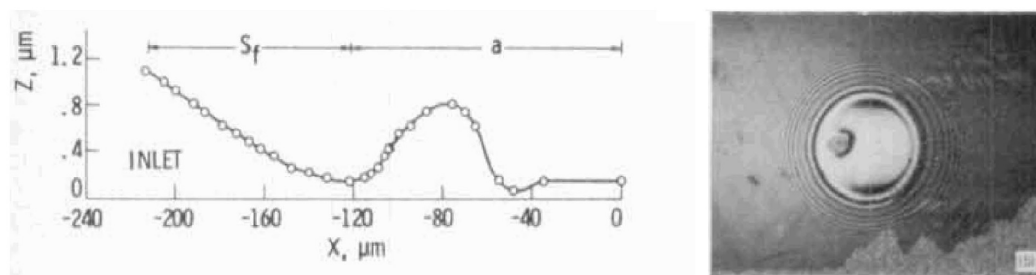
Nepříznivé účinky vyvolané pevnými částicemi lze snižovat za pomoci filtrace. Nicméně filtr nezajistí úplnému odloučení částic od styčných povrchů, a to zejména těch, které jsou menší, než je jemnost filtračního zařízení [3]. V případě, že velikost částic je větší než tloušťka mazacího filmu v rozmezí od 0,1 do 1  $\mu\text{m}$ , dochází k rýhování či důlkování povrchu, které má za následek vážné opotřebení, což vede k rychlému selhání mechanismu. V posledních desetiletích se účinkům pevných kontaminantů věnovalo mnoho pozornosti a intenzivně se tímto problémem zabývalo mnoho autorů.

Dle literatury byly provedeny četné numerické i experimentální studie zabývající se vlivem znečištění maziva v elastohydrodynamickém kontaktu. Také je třeba poznamenat, že u většiny experimentálních výzkumů byl použit hladký kontakt ocelové kuličky s transparentním diskem, kde směr pohybu soustavy je dán rotačním pohybem kuličky na skleněném či ocelovém disku.

#### 2.1.1 Vliv pevných kontaminantů na chování mazacího filmu

Tloušťka mazacího filmu při elastohydrodynamickém režimu, dále označovaném jako EHD, odpovídá stejnému řádu jako velikost drsnosti povrchu. V oblasti EHD mazání je vliv kontaminace pevnými částicemi tradičně posuzován z pohledu lokální změny geometrie při průchodu částic kontaktem. Tyto částice způsobují vznik důlků a rýh, jejichž vliv na chování mazacího filmu byl dále studován mnoha autory, jako jsou Kaneta, Kanada a Nishikawa [4], Jackson a Cameron [5], Wedeven [6], Wedeven a





Obr. 2.1 Vliv umístění povrchové nerovnosti (vpravo) na tloušťku mazacího filmu (vlevo) [6].

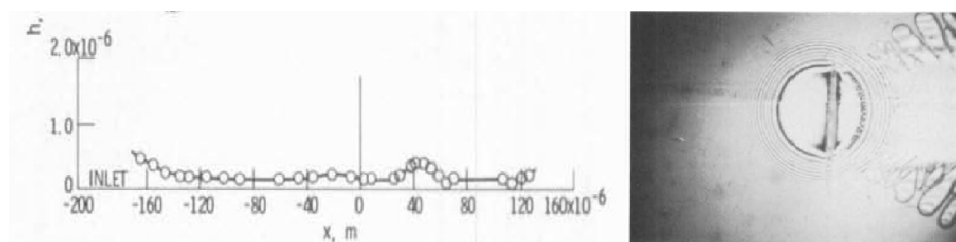
Cusano [7], Cusano a Wedeven [8, 9], Kaneta a Cameron [10], Sari, Haiahem a Flament [11] a mnoho dalších. Na vytvoření matematického modelu k určení tloušťky mazacího filmu kontaminovaného částicemi se podíleli Kang, Sadeghi a Ai [12].

### Vliv povrchových nerovností na chování mazacího filmu

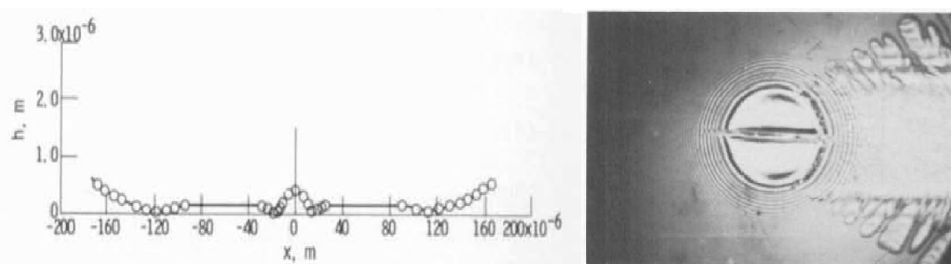
Wedeven ve své práci [6] popisuje, jak lokální elastohydrodynamické účinky mohou ovlivňovat tloušťku mazacího filmu, často spojenou se vzniklými důlky díky přenašeným nečistotám. Ty byly studovány za statických i dynamických podmínek, přičemž autor v závěru práce dospěl k následujícím výsledkům, které byly prezentovány pomocí mikrofotografií interferenčních proužků zobrazujících rozložení tloušťky filmu v blízkosti uměle vytvořených povrchových nerovností.

Porovnáním suchých a mazaných profilů s důlky ve statickém stavu zjistíme, že elastická deformace v závislosti na důlcích je snížena mazivem uvězněným v dutině důlku. Naproti tomu při dynamických podmínkách se množství elastické deformace vzhledem k důlkům mění v závislosti na centrální tloušťce filmu, s jejíž rostoucí hodnotou se důlek přibližuje k jeho nedeformovanému stavu. Dále platí, že snížení tloušťky mazacího filmu se může objevit na náběžné hraně a po stranách důlku. To může být vysvětleno pomocí lokálních změn tlaku, jež důlek vytvořil během jeho průchodu skrz vstupní oblasti [6].

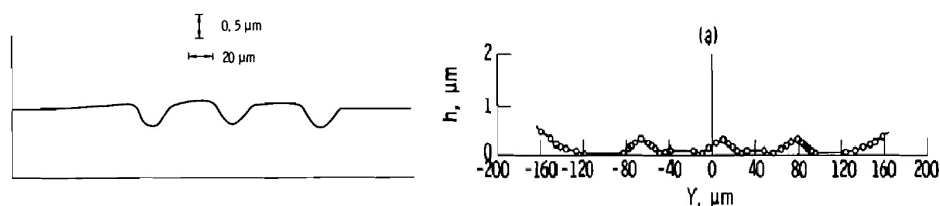
Na tento výzkum navázali Wedeven a Cusano a rozšířili ho o vliv rýh na tloušťku mazacího filmu [7]. Bylo zpozorováno, že v případě podmínek čistého valení je centrální tloušťka filmu menší u paralelně i kolmo orientovaných rýh k toku než pro hladký povrch při stejných provozních podmínkách. Také u rýh orientovaných kolmo ke směru proudění (Obrázek 2.2) se zdá, že dochází ke snížení centrální tloušťky filmu v menší míře než u rýh orientovaných rovnoběžně se směrem proudění (Obrázek 2.3).



Obr. 2.2 Mikrofotografie rýhy orientované kolmo k toku (vpravo) a její závislost na tloušťce mazacího filmu (vlevo) [7].



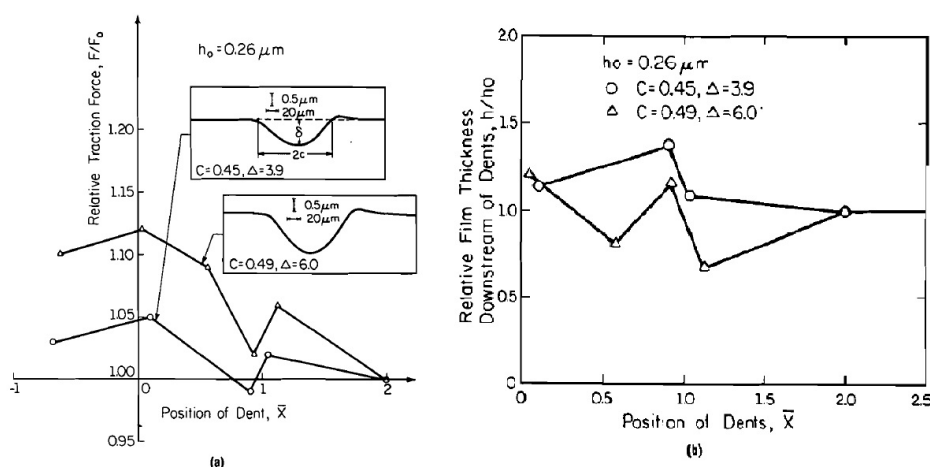
Obr. 2.3 Mikrofotografie rýhy orientované rovnoběžně s tokem (vpravo) a její závislost na tloušťce mazacího filmu (vlevo) [7].



Obr. 2.4 Změna tloušťky mazacího filmu (vpravo) vzhledem k poloze a počtu rýh (vlevo) [8].

Obecně lze konstatovat, že důlky a rýhy ovlivňují rozložení tloušťky filmu v kontaktní oblasti více, když jsou povrchy v čistém skluzu, než při čistém valení. Dále také, že změny tloušťky mazacího filmu jsou obecně lokalizovány v blízkosti defektů. Tyto výsledky experimentálně podporují koncept, podle něhož se mazané povrchy vzájemně přibližují, zejména v podmínkách skluzu. Topografie povrchu se následně úzce zapojí do procesu samotného mazání, a v důsledku toho dojde ke značné modifikaci povrchu při průchodu Hertzovou oblastí [7].

V neposlední řadě byl proveden navazující výzkum vlivu značného počtu důlků i rýh na tloušťku mazacího filmu [8] s dodatečnou závislostí na tažné síle [9]. Prvním poznatkem je možnost uměle vytvářet nerovnosti, jež jsou přibližně rozmístěny v základní vlnové délce u několika reálných (hrubých) povrchů. Změny v tloušťce filmu způsobené každou z těchto nerovností (důlkem či rýhou) se zdají být nezávislé na okolních nerovnostech, zvláště za valivých podmínek (Obrázek 2.4) [8]. Druhý poznatek zmiňuje, že při snížení centrální tloušťky filmu se mikroelastohydrodynamické



Obr. 2.5 Vliv relativní tažné síly a velikosti, respektive pozic vady na tloušťku mazacího filmu [9].

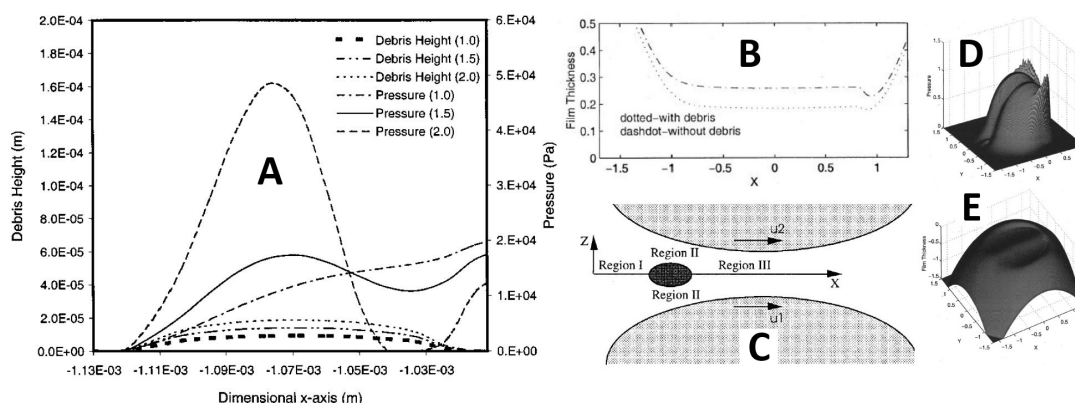
účinky způsobené nerovnostmi stávají více dominantními a mohou podstatně změnit lokalizovanou tloušťku filmu. Také dochází ke znatelnému snížení tloušťky filmu na odtokové hraně povrchových nerovností projevujících se za podmínek skluzu, a to díky nerovnostem procházejícím zúženou oblastí Hertzova kontaktu.

Rozšiřující znalostí je charakteristika filmu pomocí tzv. normalizované hloubky nerovností [9], která je specifikována parametry  $\Delta = \delta/h_0$ , kde  $\delta$  je maximální hloubka jedné nebo více nerovností a  $h_0$  je centrální tloušťka filmu v závislosti na hladkém povrchu. Na obrázku 2.5 lze pozorovat, že s nárůstem tohoto parametru dochází k nárůstu tažné síly, která může významně přispět k zahájení odírání a následnému selhání mazaného uzlu.

### Vliv pevných částic na změnu tlaku v kontaktu

K problematice vlivu pevných částic lze také přistupovat z pohledu tlakových změn způsobených částicemi procházejícími kontaktní oblastí. Díky těmto změnám dochází v kontaktu k zvyšování napětí, které později vede k rozvoji kontaktní únavy. V rámci snahy pochopit toto chování byl Kangem [12] vytvořen matematický model, pro který bylo nutné modifikovat Reynoldsovu rovnici tak, aby zahrnovala vliv elipsoidního tvaru nečistoty. Tato upravená, časově závislá Reynoldsova rovnice a rovnice elasticity byla řešena současně pro stanovení tlaku a tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu. Dále byly vyřešeny rovnice silové rovnováhy pro nečistoty, a to z důvodu stanovení jejich rychlosti.

Následně byl model použit k získání závislosti tření a tloušťky mazacího filmu na kontaktním tlaku, valivé rychlosti a různé velikosti částic (Obrázek 2.6 – C). Výsledky ukazují, že kontaminační částice mají významný vliv na rozložení tlaku (Obrázek 2.6 – A) a způsobují důlky při valení či skluzu. V závislosti na velikosti a umístění nečistot může být tlak vznikající v kontaktu natolik vysoký, že dojde k plastické deformaci ohraničující plochy. Nachází-li se ovšem částice ve vstupní oblasti, zvýšení tlaku je minimální, a v důsledku toho je její vliv na vytváření důlku na povrchu zanedbatelný [12]. Také se ukázalo, že nečistoty menší než minimální tloušťka filmu do kontaktu nevstupují, čímž nezpůsobují žádné poškození. Vstupují



**Obr. 2.6** Na obrázku A je možné vidět profil rozložení tlaku v závislosti na velikosti částice. Na B – profil tloušťky filmu podél středové osy kontaktu, C – schéma mazaného kontaktu s kontaminační částicí, D – tlakový profil, E – profil tloušťky mezního kontaktu [12].

pouze částice dostatečně velké, které do jisté míry ovlivňují tloušťku mazacího filmu (Obrázek 2.6 – B).

Obecně lze říci, že kontaminační částice se pohybuje směrem ke kontaktu kvůli povrchovým trakčním silám a hydrodynamickému tlaku, které na ni působí. Klíčovou roli ovšem hraje oblast zpětného proudění na vstupu kontaktu, která rozhoduje o dalším pohybu kontaminačních částic. V případě, že je velikost částice menší než velikost oblasti zpětného proudění, trakce tekutin a síly v kapalinách začnou působit proti danému pohybu, čímž částici vychýlí a zamezí jí vstoupit do kontaktu. Naopak když je velikost částice větší než minimální tloušťka filmu a velikost oblasti zpětného proudění, dojde k pohybu částice směrem ke kontaktu [12].

### 2.1.2 Vliv pevných kontaminantů na opotřebení, teplotu a drsnost povrchu

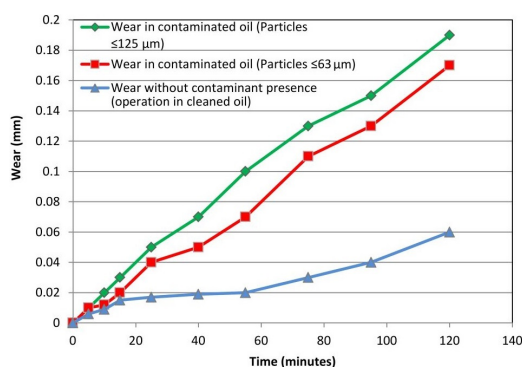
Opotřebení, vzrůstající teplota a drsnost povrchu úzce souvisejí s utvářením mazacího filmu, tudíž velikost a počet kontaminačních částic mají i na jeho chování zásadní vliv.

Maatallah ve svém výzkumu [3] využívá experimentálního zařízení k ověření vlivu pevných kontaminantů na selhání EHD valivého kontaktu. Tato práce se soustředila zejména na stanovení predikčních vztahů pro opotřebení (Rovnice 2.1) a drsnost povrchu (Rovnice 2.2). Jako kontaminační částice byl použit písek s 90% obsahem křemene a za mazivo bylo zvoleno ISO VG 220.

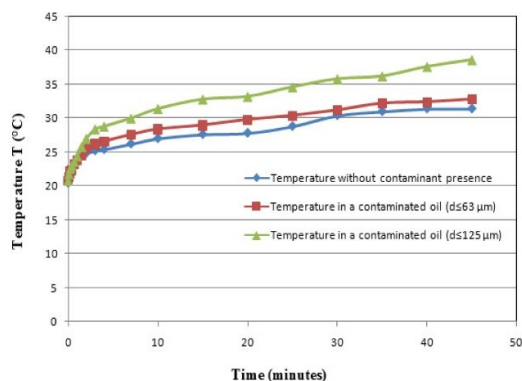
$$W = 0.205 - 0.028H + 0.00509C - 0.000047Q - 0.000011V, \quad (2.1)$$

$$Ra = 1.40086 - 0.031282H + 0.0752453C - 0.00214811Q - 0.000243707V, \quad (2.2)$$

Hlavní závěry, které lze z této studie vyvodit, jsou následující. Přítomnost dostatečně velkých pevných částic v mazacím filmu zvyšuje tření, které dále vzrůstá s rostoucí velikostí částice, a způsobuje značné opotřebení v prvních pracovních cyklech (Obrázek 2.7). V důsledku toho dochází k nárůstu teploty mezi styčnými povrchy (Obrázek 2.8).



Obr. 2.7 Vliv znečištění maziva na vývoj povrchového opotřebení v závislosti na čase [3].



Obr. 2.8 Vliv znečištění maziva na vývoj teploty v závislosti na čase [3].

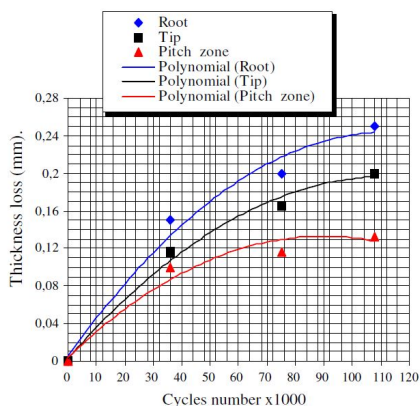
Test	Coded Factors				Actual Factors				Responses' Factors		
	X1	X2	X3	X4	H (HRC)	C [g/l]	Q [Kg]	V [rpm]	W [mm]	Ra [ $\mu$ m]	Rt [ $\mu$ m]
1	1	1	1	1	46	5	10	200	0.092	0.65333	8.5
2	1	2	2	2	46	7.5	13	400	0.109	0.82333	11.6
3	1	3	3	3	46	10	16	640	0.11	1.26333	12
4	2	1	2	3	55	5	13	640	0.062	0.52133	6.7333
5	2	2	3	1	55	7.5	16	200	0.066	0.55667	6.9667
6	2	3	1	2	55	10	10	400	0.0904	0.72667	7.6333
7	3	1	3	2	59	5	16	400	0.058	0.39333	3.3333
8	3	2	1	3	59	7.5	10	640	0.06	0.44667	5.8667
9	3	3	2	1	59	10	13	200	0.088	0.70667	7.9667

Obr. 2.9 Jednotlivé podmínky pro různé kombinace provozních parametrů [3].

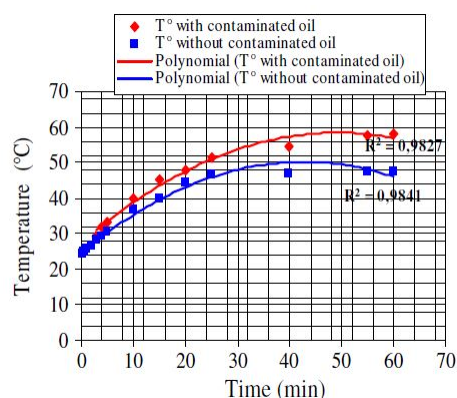
Dále je ze snímků z optického mikroskopu zřejmé, že opotřebení v čistém oleji je velice nízké, zatímco v kontaminovaném oleji došlo díky adhezi a erozi pevných částic ke značnému narušení povrchu. Míra tohoto opotřebení ( $W$ ) a drsnosti povrchu ( $Ra$  a  $Rt$ ) se snižuje s rostoucí tvrdostí válcového vzorku ( $H$ ) a vzrůstá s rostoucí koncentrací kontaminantů ( $C$ ). Podstatné jsou i výsledky analýzy ANOVA (zabývá se opotřebením a tvrdostí povrchu), které ukazují, že tvrdost povrchu a koncentrace kontaminantů jsou faktory, které mají značný vliv na vývoj opotřebení a drsnost povrchu. Mimo jiné v ní figuruje i úhlová rychlost ( $V$ ) a použité zatížení ( $Q$ ). Výsledným porovnáním experimentálních a predikčních hodnot bylo dosaženo dobré shody mezi výsledky (Obrázek 2.9).

Této problematice se věnoval také Sari, který zkoumal vliv kontaminace maziva na ozubeném soukolí [11]. Autor dospěl ve své práci ke stejným základním poznatkům o vlivu pevných částic na míru opotřebení, změnu tření i teploty a rozšířil je o poznatky specifické pro ozubená soukolí, které jsou následující.

Nejvyšší opotřebení je u paty zubu, protože je na tomto místě přítomna vysoká míra skluzu a velká ohybová tuhost v porovnání se špičkou zubu. V této oblasti také dochází vlivem přítomnosti abrazivních částic k většímu nárůstu teploty než v jiných místech ozubeného soukolí (Obrázek 2.11). To se děje v důsledku zvýšeného tření [11], přičemž narůstá i opotřebení (Obrázek 2.10), čímž dochází ke znehodnocení kvality povrchu. Přítomnost částic písku dále vede ke zvýšení drsnosti povrchu.



Obr. 2.10 Ztráta tloušťky materiálu v různých místech pastorku [11].



Obr. 2.11 Vývoj teploty u čistého a kontaminovaného oleje v ozubeném soukolí [11].



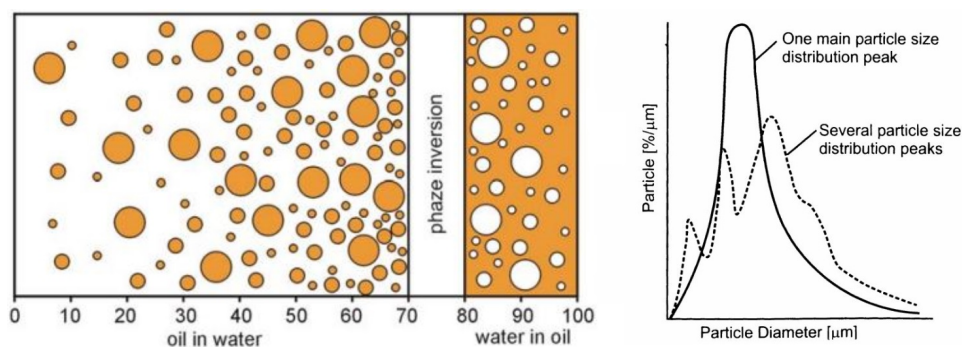
## 2.2 Kontaminace vlhkostí

Kontaminace oleje vlhkostí v mazacím filmu způsobuje nárůst podílu vody ve směsi, ve které dále dochází k rozptýlu částic obou tekutin a za jistých podmínek může dojít ke vzniku emulze. Voda se může dostat do mazacího filmu mnoha způsoby, např. kondenzací par v prostředí s vysokou vlhkostí nebo vlivem rychlé změny tlaku vzduchu skrz těsnění či přes nedokonalý kontakt. Bennerovi [13], Wanovi [14], Zhuovi [15] a v neposlední řadě Koutnému [16] se podařilo ve svých pracích provést rozsáhlé studie o vlivu vody na utváření mazacího filmu.

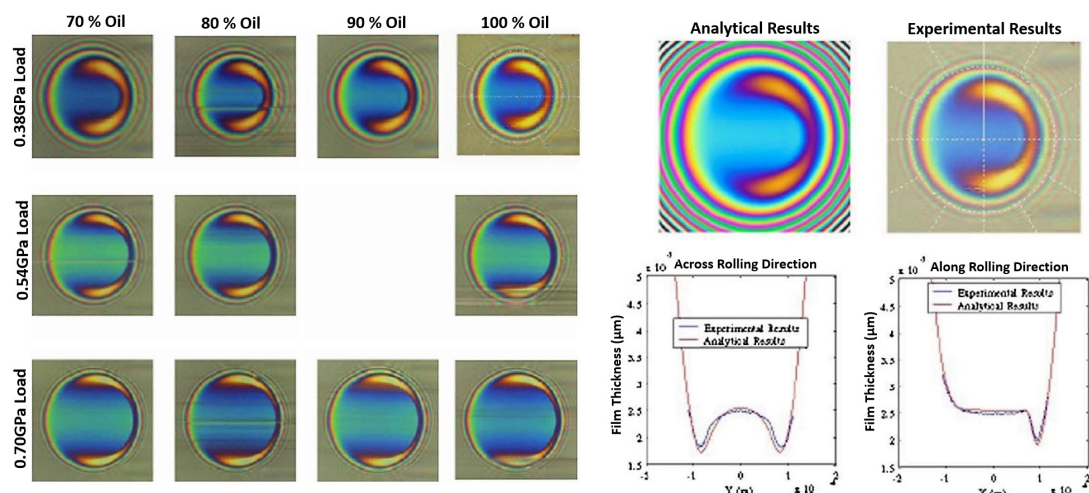
### 2.2.1 Vliv kontaminace oleje vlhkostí na tloušťku mazacího filmu a tření

Většina dosavadních studií se zabývala pozorováním chování emulzí v EHD kontaktu. Tyto emulze lze dělit na olej ve vodě, kdy je značné množství oleje rozptýleno ve vodě, a na vodu v oleji, kdy je množství vody, v závislosti na procentuální koncentraci kontaminace, rozptýleno v oleji (Obrázek 2.12). V rámci této práce nás bude více zajímat emulze vody v oleji. Důležité je zmínit, že velikost rozptýlených částic (Obrázek 2.12) společně s jejich koncentrací zásadně ovlivňuje výsledné chování a vlastnosti emulze. Velikost těchto rozptýlených částic je jedním z hlavních parametrů určujících jejich stabilitu a zároveň rozhodujícím faktorem pro mazivostní účinky. Chování emulzí bylo pozorováno převážně optickou interferometrií.

Podstatnou studií experimentálního a analytického přístupu k zatíženým kontaktům mazaným emulzí vody v oleji je práce Bennera [13]. Ten vytvořil funkční model popisující zmíněný zatížený kontakt, který následně testoval při různých podmínkách, např. změně tlaku, rychlosti či procentuální kontaminace oleje. Z interferogramů (Obrázek 2.13) je zjevné, že výsledky jednotlivých měření jsou téměř totožné [13], což naznačuje, že kontaminace vodou má minimální, téměř nulový vliv na tloušťku mazacího filmu při daných podmínkách. Na změnu tloušťky mazacího filmu dané emulze nemělo vliv ani viskóznější mazivo či drsnější povrch kontaktních součástí. Další testy v jiných konfiguracích vedly k obdobným výsledkům, u kterých je možné pozorovat podstatnou shodu minimální tloušťky filmu mezi čistým olejem a 30% emulzí vody v oleji.



**Obr. 2.12** Na levém obrázku lze pozorovat závislost fáz. přechodu mezi emulzí oleje ve vodě a vodě v oleji na koncentraci oleje. Na pravém obrázku rozložení velikosti částic v emulzích [17].

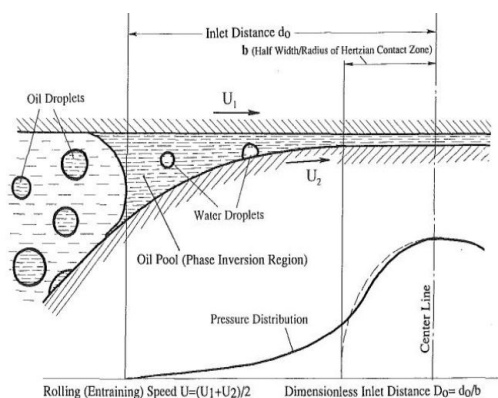


Obr. 2.13 Vlevo - experimentální interferogramy získané při rychlosti 1 m/s, se zatížením 0,38 GPa, 0,54 GPa a 0,7 GPa při čistém valení. Vpravo - porovnání experimentálních a analytických výsledků tloušťky mazacího filmu při čistém valení [13].

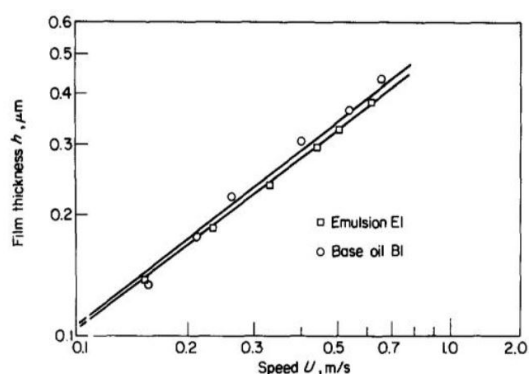
Doplňujícími znalostmi jsou informace o důležitosti povrchového napětí. Díky polaritě vodních molekul dochází ke spojení více menších kapek do jedné velké a to způsobí nárůst povrchového napětí vody, které může být, spolu s Van der Waalsovými přitažlivými silami, odpovědné za zpětný tok maziva do vnější stopy kontaktu [16]. Je evidentní, že na zmíněných interferogramech (Obrázek 2.16) jsou vodní kapičky přichyceny k povrchu kuličky, a to i v případě úplného zastavení třecích povrchů. Dále je zřejmé, že tloušťka mazacího filmu se nezmenšuje (Obrázek 2.15), a to ani za podmínek velmi nízké valivé rychlosti i různých viskozit, při kterých voda zaplňuje stopu a vytváří vodní kapky ve vstupní oblasti kontaktu.

Toto chování bývá nejčastěji vysvětlováno tzv. *plate out* efektem [14], dle kterého se kapičky oleje přilepí k jednomu z povrchů kontaktních těles (díky afinitě pevného povrchu s olejovou fází) a rozprostřou se do známého smáčecího úhlu  $\varphi$ , dokud kontakt zcela nezaplní (Obrázek 2.14), čímž nedojde k ovlivnění chování mazacího filmu. Při navýšení valivé rychlosti poté dochází k vytlačování vodních kapiček ze stopy filmu, díky čemuž do kontaktu vstupuje pouze čistý olej [16].

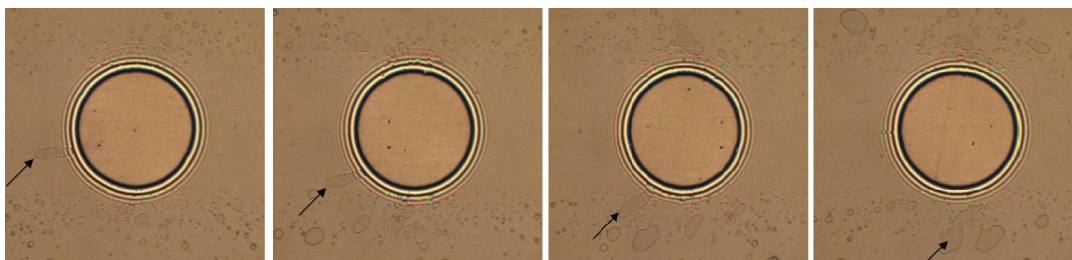
K obdobným závěrům dospěly všechny práce (Wan [14], Zhu [15], Banner [13],



Obr. 2.14 Náčrt inverze fází ve vstupní oblasti kontaktu [15].



Obr. 2.15 Změna tloušťky filmu vlivem kontaminace maziva [14].



Obr. 2.16 Pohyb vodní kapičky ve vstupní a okolní oblasti kontaktu pro olej HPO 100 [16].

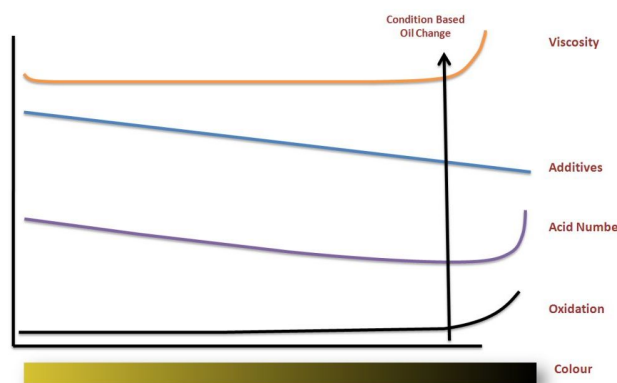
Koutný [16]), ve kterých se mimo jiné podařilo odvodit nezávislost měrného součinitele tření na úrovni kontaminace maziva. Těmito experimenty bylo potvrzeno, že vodní kapičky do kontaktu mezi třecími povrchy nevstupují a mazací film je utvářen pouze čistým olejem (Obrázek 2.14) [15]. Získané výsledky byly v závěru porovnány s experimentálními daty (Obrázek 2.13), kde u analytických a experimentálních výstupů bylo dosaženo dobré shody. V případě použití pouze čisté vody došlo k výraznému tření i opotřebení mezi třecími povrchy, a to kvůli nedostatečné tloušťce mazacího filmu. [13]

## 2.3 Degradace maziva

Degradace maziva vede ke korozi, změně viskozity, k tvorbě kalů i povlaků a může mít za následek poruchy zařízení [18]. Mazivo je také v provozu vystavováno širokému rozsahu fyzikálních i chemických podmínek, které mohou negativně ovlivnit jeho základový olej s přísadami. Mezi tyto faktory patří teplo, proudící vzduch, neslučitelné plyny, vlhkost, vnitřní nebo vnější kontaminace, procesní prvky, radiační záření či neúmyslné smíchání s jinou kapalinou. Degradaci maziva lze rozdělit dle *oxidace* a *tepelné* či *mechanické degradace*.

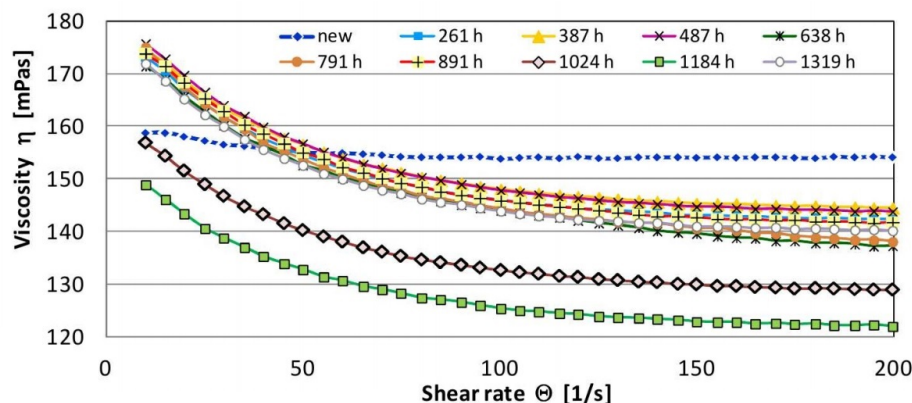
### 2.3.1 Degradace maziva oxidací

Nejběžnější formou degradace maziva je oxidace, která je charakteristická reakcí materiálů s kyslíkem, při níž reaguje kyslík s ostatními molekulami, což má za následek ztrátu elektronu tvořícího volný radikál [19]. K oxidaci dochází za mírných podmínek



Obr. 2.17 Změna parametrů maziva s nárůstem degradace maziva [22].



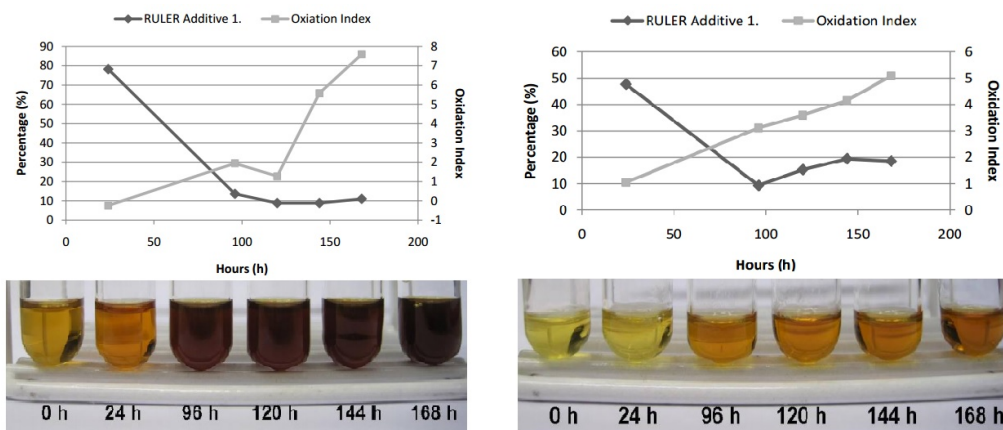


Obr. 2.18 Změna viskozity s nárůstem jeho degradace [22].

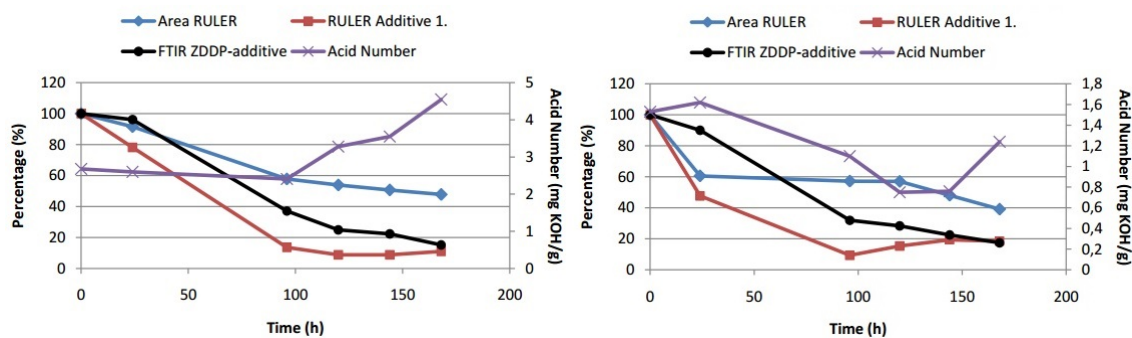
postupným vyčerpáním antioxidantů. Antioxidanty jsou látky používající se ke stabilizaci maziva a k zabránění oxidaci tím, že omezují aktivitu kyslíkových radikálů. Jakmile oxidace započne, způsobí závažnou a trvalou chemickou změnu základového oleje, jež má za následek zmíněnou degradaci. Řada faktorů urychluje tento proces, např. voda, kovy (železo, měď), jiné nečistoty nebo zvýšené provzdušnění. Ovšem nejdůležitějším faktorem je teplota, která značně urychluje proces oxidace. Ten je popsán Arrheniovým pravidlem, jenž uvádí, že s každým zvýšením teploty o 10 °C se rychlost oxidace zdvojnásobí.

Viskozita je jednou z hlavních charakteristických veličin udávajících stav maziva. V současné literatuře můžeme nalézt rozcházející se názory na změnu viskozity vlivem nárůstu oxidační degradace. Höhn ve své práci [20] analyzoval pět převodových minerálních olejů určených pro různé aplikace, kde každý z nich podléhal degradaci při dvou různých teplotách. Ve výsledcích je pozorovatelný nárůst viskozity s poklesem obsažených přísad u všech olejů a obou teplot. K těmto výsledkům dospěla i firma KEW Engineering [22], přičemž názorná ukázka změny parametrů vlivem degradace je k vidění na obrázku 2.17.

K opačným výsledkům dospěl ve své studii Sikora [21], který testoval různé druhy motorových olejů v rozsahu teplot od 10 do 90 °C. Tyto vzorky reprezentovaly stav



Obr. 2.19 Porovnání olejů typu B (vlevo) a C (vpravo) vzhledem k jejich oxidačnímu indexu a uplynulému času [19].

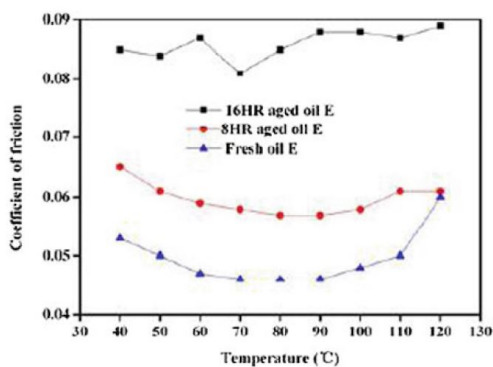


Obr. 2.20 Porovnání čísla kyselosti u olejů typu B (vlevo) a C (vpravo) vzhledem k uplynulému času [19].

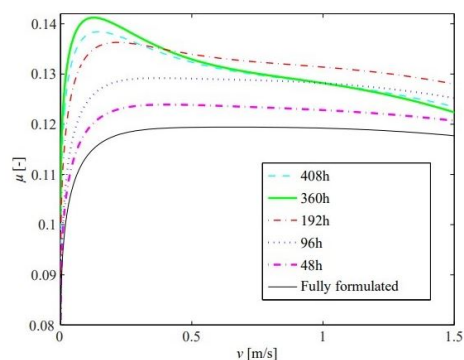
oleje najetém na automobilu po 261 až 1319 hodinách. Z výsledků plyne závislost poklesu viskozity na rostoucí míře degradace maziva, a to při všech naměřených teplotách, rychlostech i tlacích (Obrázek 2.18). Vzhledem k rozporuplnosti výsledků mnoha autorů se touto problematikou bude práce dále zabývat.

Jednotlivé diagnostikovatelné parametry oxidačně degradovaných olejů zkoumala ve své práci Maguire [19] s použitím diagnostických metod RULER a MPC. V tomto výzkumu byly uvedeny normované postupy degradace maziva oxidací, a to rotační tlakovou nádobou, turbínovým stabilizačním testem, tepelným testem a mnoha dalšími. Výsledky této práce poukazují na závažný vliv oxidace na zvolené mazivo a zvolenou metodu oxidace (Obrázek 2.19), kde nejúčinnější přípravou vzorku se jevila metoda turbínového testu stability s použitím vody jako katalyzátoru, neboť u ní bylo docíleno nejrychlejšího nárůstu hodnoty kyselosti (Obrázek 2.20). Metody následného vyhodnocování oxidačně degradovaných vzorků bývají nejčastěji hodnoceny pomocí viskozity, dielektrické konstanty, čísla kyselosti (TAN), čísla zásaditosti (TBN) či optické metody za použití kolorimetrie. Ve výsledcích práce vykazovaly degradované oleje jistý výkyv hodnoty viskozity, kde u určitých olejů došlo ke změně kinematické viskozity až o 100 %, ovšem tyto změny se nepodařilo zcela kvantifikovat a vyvodit z nich obecné závěry.

Navazující oblastí výzkumu je vliv oxidační degradace na tření, kterému se věnovali především autoři Berglund [23] či Wang [24]. Výzkum Berglunda se zakládal na testování vzorků vyrobených turbínovým stabilizačním testem (TOST), za-



Obr. 2.21 Nárůst tření vlivem oxidační degradace maziva [24].



Obr. 2.22 Nárůst tření vlivem oxidační degradace maziva [23].

tímco v práci Wangu byl využit princip rotační nádoby s katalyzátory (RBOT). U obou prací byly vytvořeny vzorky o určité míře degradovaného maziva, které byly dále zkoumány z hlediska únosnosti mazacího filmu. Výsledky popisují nárůst tření v obou případech (Obrázek 2.21 a 2.22), přičemž k maximálnímu nárůstu došlo až o 80 % vzhledem k původní hodnotě pro čistý olej. Vliv oxidační degradace na změnu tloušťky mazacího filmu zde, i v ostatních pracích zcela chybí.

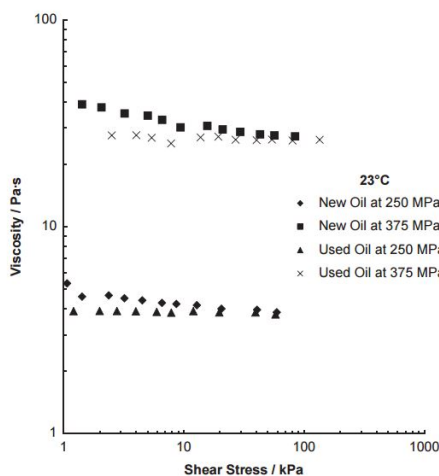
### 2.3.2 Tepelná degradace maziva

V mechanickém pracovním prostředí je teplota maziva prvořadým zájmem. Kromě oddělení pohyblivých částí strojního zařízení musí mazivo zajistit mnoho funkcí, zejména odvod tepla [18]. To znamená, že mazivo je často vystavováno zvýšeným teplotám, vlivem kterých může dojít ke ztrátě mazacích vlastností nebo také ke zvýšení viskozity maziva či urychlení ostatních degradačních procesů, např. oxidace (viz Arrheniovo pravidlo).

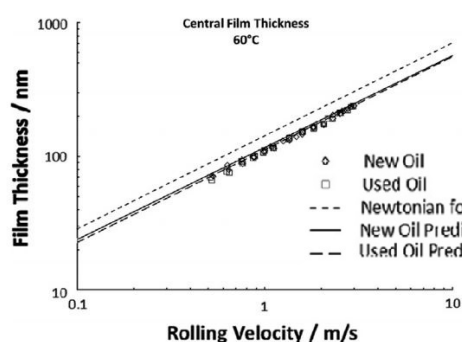
V jistých případech se může mazivo vlivem specifických procesů zahřát nad svou doporučenou stabilní teplotu, přičemž dojde k rozpadu větších molekul na molekuly menší. Toto tepelné krakování, často označované jako tepelná destrukce, může zahájit vedlejší reakce jako vyvolání polymerace, produkci vedlejších plynů, znehodnocení přísad nebo vytváření nerozpustných vedlejších produktů. V některých případech tepelná degradace způsobí snížení viskozity [18].

### 2.3.3 Mechanická degradace maziva

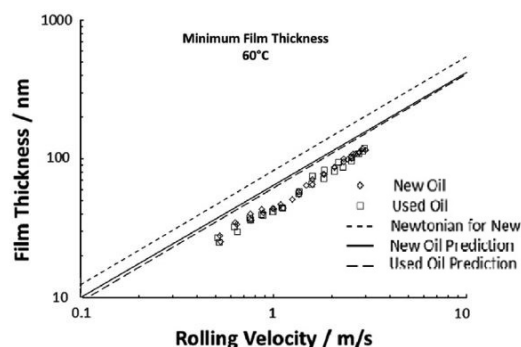
K problematice mechanické degradace maziva a jejího vlivu na tloušťku mazacího filmu vypracoval Bair [25] experimentální studii, zahrnující závislost viskozity čistého i degradovaného oleje při nízkém i vysokém smykovém napětí. Z naměřených hodnot vyplývá, že pro tento konkrétní systém byla mechanickou smykovou degradací ovlivněna pouze viskozita při nízkém smykovém napětí (až o 23 %), zatímco viskozita při vysokém napětí zůstala nezměněna (Obrázek 2.23).



Obr. 2.23 Porovnání smykových závislostí viskozity u nového a použitého oleje [25].



Obr. 2.24 Naměřená centrální tloušťka filmu při 60 °C pro nový a použitý olej včetně predikcí. Newtonova předpověď pro nový olej je taktéž pro porovnání znázorněna [25].



Obr. 2.25 Naměřená minimální tloušťka filmu při 60 °C pro nový a použitý olej včetně predikcí. Newtonova předpověď pro nový olej je taktéž pro porovnání znázorněna [25].

K následnému teoretickému výpočtu tloušťky filmu byla použita specifická newtonská rovnice popsaná ve vědeckém článku Habchiho [26]. Nezbytné experimentální hodnoty centrální a minimální tloušťky filmu (Obrázek 2.24 a 2.25) byla získána použitím metody kolorimetrické interferometrie, u které se sledoval kontakt mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem za EHD podmínkách.

Experimentálním proměřením tloušťky filmu se potvrdily analytické predikce, které popisují vliv mechanické degradace na změnu tloušťky mazacího filmu. Tato změna tloušťky ovšem není v rámci použitých vstupních podmínek významná, a to i přesto, že došlo k značnému poklesu viskozity při nízkých smykových napětích. Je tudíž zřejmé, že hodnoty naměřené viskozimetrem při vysokém napětí vyskytující se na vstupu EHD kontaktu jsou nezbytné k pochopení schopnosti čistého a degradovaného oleje utvářet mazací film [25].

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Výskyt maziva mezi třecími povrchy významně snižuje tření i opotřebením a tím prodlužuje životnost součástí. V nynější době je na životnost komponent kladen velký důraz, jelikož po skončení jejich technického života je následná oprava finančně poměrně náročná. Díky tomu byly vyvinuty různé přístupy k údržbě, které umožňují oddálit ukončení chodu stroje. Tyto systémy hlídají míru kontaminace a degradace maziva, neboť ty jsou jednou z hlavních příčin předčasného selhání strojních součástí. Aby tyto systémy správně fungovaly, je nejprve nutné popsat a pochopit vliv kontaminace a degradace maziva na chování mazacího filmu, zejména na jeho tloušťku a tření v kontaktu.

Z rešeršní části práce vyplývají poznatky o vlivu kontaminace a degradace maziva na chování mazacího filmu, které lze rozdělit na *kontaminaci pevnými částicemi*, *kontaminaci vlhkostí* a *degradaci maziva*.

V první části práce je čtenář seznámen s vlivy povrchových nerovností (důlků a rýh) na tloušťku mazacího filmu. Cusano a Wedeven ve svých pracích zmiňují úplnou shodu v chování důlků a rýh, vytvořených buď uměle indentorem nebo abrazí, která je způsobována částicemi procházejícími kontaktem. Vědecké práce a články zabývající se vlivem důlků a rýh jsou tudíž nezbytné pro úplné pochopení chování mazacího filmu kontaminovaného částicemi. Z výsledků vyplynulo, že důlky a rýhy vzniklé mechanickým poškozením ovlivňují tribologický uzel zejména z hlediska značného nárůstu tlaku, který se zvyšuje s rostoucí velikostí částic, s následným dopadem na kontaktní únavovou životnost a také z hlediska lokální změny tloušťky mazacího filmu. Například u rýhy o hloubce  $0,5\ \mu\text{m}$  a šířce  $20\ \mu\text{m}$  docházelo k lokální změně tloušťky až o  $0,05\ \mu\text{m}$ , kde s každým dalším zvětšením hloubky důlku či rýhy se měnila tloušťka mazacího filmu. Dále je zmíněn vliv pevných částic na tření, opotřebením a drsnost povrchu i s jejich predikčními vztahy za určitých vstupních podmínek. Také je zmíněn vliv velikosti pevných částic na vývoj teploty v kontaktu. Ovšem výsledky kvantifikující vliv kontaminace na jiné parametry (např. abrazivní opotřebením) vzhledem k reálně diagnostikovatelným veličinám zde chybí.

Ve druhé části rešerše byl popsán vliv procentuálního zastoupení vody v oleji na tloušťku mazacího filmu. Tyto emulze byly pozorovány při dynamických podmínkách Bennerem, Zhuem či Wanem a z výsledků lze usuzovat, že vodní kapičky do EHD filmu nevstupují, tudíž jejich vliv na tloušťku mazacího filmu je nevýznamný. Také v těchto pracích vystupuje vliv obsažené vody na tření, ovšem ani ten není příliš podstatný. Nicméně v inženýrské praxi obsah vody vystupuje jako základní diagnostický parametr, a proto je zapotřebí se tomuto problému věnovat detailněji a zaměřit se na způsoby kontaminace, které by lépe reprezentovaly podmínky používané v reálných soustavách.

Ve třetí, poslední části práce je shrnut vliv degradace maziva na jeho chování. Nejprve jsou popsány časově závislé oxidační účinky maziva, jejich působení ve filmu a závislost na teplotě. Dále bylo snahou popsat vliv oxidační degradace na změnu viskozity, ovšem ze současné literatury vyplývají rozporuplné závěry. Příkladem je práce Höhna, ve které je popsán nárůst viskozity s rostoucí mírou oxidační degradace

maziva, a práce Sikory, která naopak popisuje pokles viskozity s nárůstem míry degradace maziva. Mimo to jsou představeny vlivy oxidační degradace na tření, které v důsledku nárůstu degradace roste. Navázání výsledků týkajících se oxidační degradace na změnu tloušťky mazacího filmu a na reálně diagnostikovatelné veličiny zde zcela chybí, tudíž je potřeba tuto oblast pokrýt dalšími experimenty. Dále se také podařilo experimentálně ověřit analytické predikce vlivu, který má míra mechanické degradace maziva na tloušťku filmu. Z výsledku lze usuzovat, že tento vliv je pouze nepatrný. Avšak celkově se vlivu degradace maziva v závislosti na tloušťce filmu věnovalo jen několik málo prací.

## 3.2 Cíle práce

Hlavním cílem je stanovit vliv různých druhů kontaminantů maziva a jeho degradace na utváření mazacího filmu za různých provozních podmínek, zejména s ohledem na limity únosnosti filmu. Použit bude optický tribometr a tribometr pro měření tření.

Dílní cíle diplomové práce jsou:

- prostudovat dostupné literární zdroje a navrhnout plán experimentů,
- realizovat a vyhodnotit sérii experimentů,
- stanovit vliv míry kontaminace a degradace s ohledem na mazací film,
- připravit publikaci výsledků.



## 4 MATERIÁLY A METODY

V následující kapitole jsou popsány jednotlivé metody, laboratorní zařízení a materiály nezbytné pro změření a vyhodnocení experimentálních dat této diplomové práce.

### 4.1 Metody a zařízení

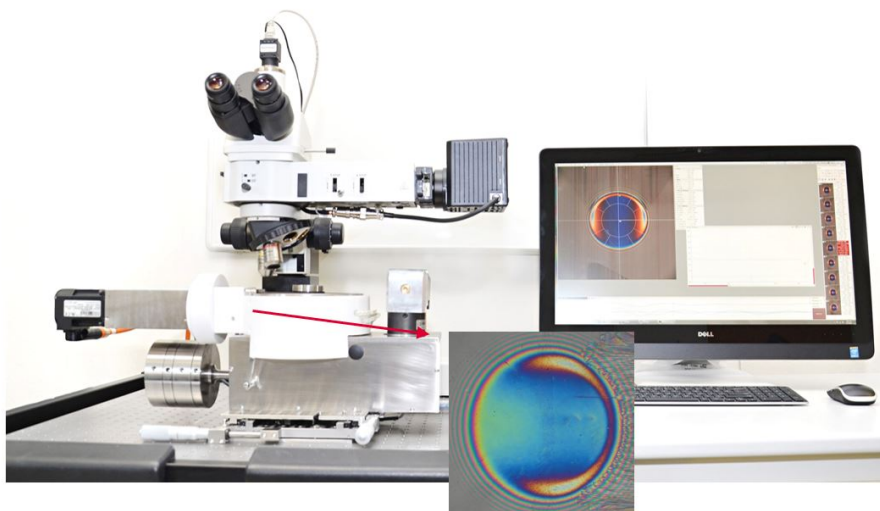
#### 4.1.1 Klíčová experimentální zařízení

##### Optický tribometr

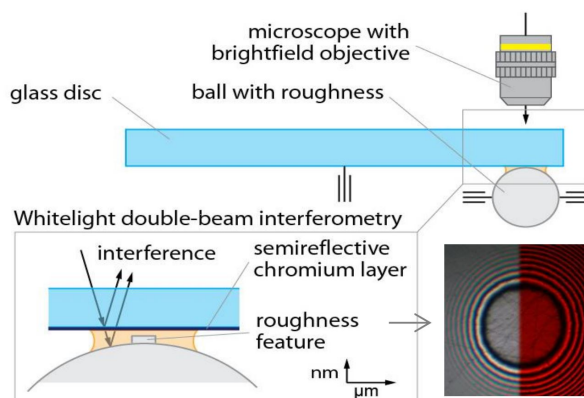
Optický tribometr je laboratorní zařízení (Obrázek 4.1), nacházející se v tribologických laboratořích Ústavu konstruování, které slouží k simulaci stavů přítomných v reálných tribologických uzlech. Metoda, na základě které zařízení pracuje, vychází z principu optické interferometrie, která patří k nejčastějším metodám pro pozorování a studium chování tenkých mazacích filmů. Tloušťka těchto filmů je zjištěna z jednotlivých interferenčních proužků [27], vznikajících koherentní superpozicí světelných vln odražených od jednotlivých úrovní rozhraní pozorované oblasti (Obrázek 4.2).

Pozorovanou oblastí je bodový kontakt ocelové kuličky o průměru 25,4 mm, na které při rotaci ulpívá mazivo a to dopravuje do místa kontaktu, s diskem ze safíru či optického skla o průměru 156 mm (Obrázek 4.2). Aby bylo možné získat dostatečně kontrastní snímky, je disk opatřen na horní straně antireflexní vrstvou [28] a na druhé straně tenkou vrstvou chromu. Také díky nezávislým pohonům kontaktních těles lze pozorovat film v různých kinematických podmínkách, jako jsou čisté valení nebo různé hodnoty kladného i záporného skluzu. Další dosažitelná veličina je kontaktní tlak, který je realizován pomocí dvojzvrtné páky s přídatnými závažími.

Měření probíhá pomocí světla procházejícího soustavou čoček, které dopadá na pozorovanou kontaktní oblast [27], kde se od chromové vrstvy disku část světla odrazí a zbytek světla se odrazí až od ocelové kuličky (Obrázek 4.2). Následný interferenční



Obr. 4.1 Optický tribometr na Ústavu konstruování.



Obr. 4.2 Znázornění principu optické interferometrie [27].

Tab. 4.1 Technické parametry optického tribometru [31].

Parametry	Hodnota
Zatížení	0 až 50 $N$
Rychlost třecích povrchů	0 až 4 $m \cdot s^{-1}$
Kontaktní tlak (Hertz)	0 až 1,5 $GPa$
Rozsah měření tloušťky mazacího filmu	1 až 1000 $nm$
Teplotní rozsah měření	do 70 $^{\circ}C$

obrazec vznikne právě kombinací těchto dvou, různě odražených paprsků a putuje přes objektiv do pozorovacího místa mikroskopu [28], který je vybaven kamerou Sony Flea3. Získané hodnoty interferogramů jsou poté vyhodnoceny pomocí softwaru Achilles, kde se na základě vstupních parametrů při kalibraci přiřadí jednotlivým barvám interferogramu odpovídající tloušťka mazacího filmu. Parametry optického tribometru jsou uvedeny v Tabulce 4.1.

### Mini Traction Machine (MTM)

Zařízení Mini Traction Machine (MTM) od firmy PCS Instruments (Obrázek 4.3) se obecně používá k měření velikosti součinitele tření či adheze v závislosti na stanovené konfiguraci v mazaných i nemazaných kontaktech. Tak jako u optického tribometru se v této práci využívá konfigurace *ball-on-disc* s průměrem kuličky 19,05 mm a průměrem disku 46 mm (Obrázek 4.3).



Obr. 4.3 Zařízení Mini Traction Machine (MTM) [34].



Tab. 4.2 Technické parametry Mini Traction Machine (MTM) [31].

Parametry	Hodnota
Zatížení	0 až 75 $N$
Kontaktní tlak	0 až 1,25 $GPa$
Rychlost	0 až 4 $m \cdot s^{-1}$
Možnost skluzu	0 až 100 %
Objem testovaného vzorku	0 až 35 $ml$

Princip měření se zakládá na přitlaku ocelové kuličky na ocelový disk [34], kde každá z těchto komponent má nezávislý pohon, což umožňuje nastavit různé podmínky pro měření valení i skluzu. Na zařízení se nachází senzor trakce k měření tření mezi kuličkou a diskem, jakož i senzor k měření teploty, zatížení a opotřebení. Parametry zařízení jsou uvedeny v Tabulce 4.2.

#### 4.1.2 Zařízení pro analýzu vzorku

##### Rotační reometr RotoVisco

Rotační reometr RotoVisco od společnosti HAAKE je komerční zařízení určené k měření parametrů kapalin, zejména viskozity. Toto zařízení (Obrázek 4.4) díky robustní konstrukci, automatickým posuvům a přesnému umístění jednotlivých rotačních součástí [29] zaručuje přesnou reprodukovatelnost výsledků dílčích měření. Reometr RotoVisco s mechanickými ložisky a parametry uvedenými v Tabulce 4.3 je tudíž ideálním zařízením pro měření viskozity kontaminovaných či degradovaných kapalin. V rámci měření byl zvolen senzor DG 41Ti.

Tab. 4.3 Parametry reometru RotoVisco od firmy HAAKE [29].

Parametry	Hodnota
Zatížení	0 až 75 $N$
Kontaktní tlak	0 až 1,25 $GPa$
Rychlost	0 až 4 $m \cdot s^{-1}$
Možnost skluzu	0 až 100 %
Objem testovaného vzorku	0 až 35 $ml$



Obr. 4.4 Rotační reometr RotoVisco [29] a temperační jednotka Haake 41 [30].

Princip zařízení spočívá v měření, porovnání a vyhodnocování momentů sil [29], které musí jednotlivé rotační součásti během měření překonávat. Nevýhodou tohoto zařízení je nedostatečný výhřev vzorků kapaliny, tudíž je nutná externí temperační jednotka, např. Haake 41. Veškerá měření a zpracování dat probíhají v softwaru RotoVisco, dodaném výrobcem.

### 3D optický profilometr Contour GT-X

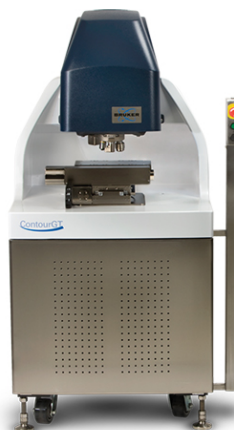
Ke správnému a přesnému vyhodnocení kontaktních těles z hlediska drsnosti, opotřebení či tvaru povrchu se na Ústavu konstruování používá 3D optický profilometr Contour GT-X od firmy Bruker [33]. Tento optický profilometr (Obrázek 4.5) s parametry popsány v Tabulce 4.4 slouží k bezkontaktnímu mapování topografie povrchů. Zařízení využívá metody *vertical scanning interferometry* (VSI), která je vhodná pro drsné a nespojitě povrchy, často s rýhami i důlky [32], a u které je změna výšky skenovací hlavy s přesně definovaným krokem realizována piezo-elektrickými posuvy. Následně pomocí referenčního zrcátka a děliče svazku světla vznikne interference, která je vyhodnocena pomocí softwaru Vision64. V případě hladších povrchů lze použít variantu VSI s vysokým rozlišením, označovanou jako VXI.

Tab. 4.4 Technické parametry 3D optického profilometru Contour GT-X [31].

Parametry	Hodnota
Zvětšení	0,5x až 200x
Rozlišení	0,01 nm
Skenovací rozsah v ose Z	0,1 až 10 nm
Skenovací rychlost	92,5 $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

### Senzor stavu oleje LubCos H2O+ II a LubCos Vis+

Senzor vlhkosti LubCos H2O+ II od firmy Argo Hytos (Obrázek 4.6) byl použit k určení zastoupení vody v oleji [35] při kontaminování oleje vlhkými parami. Princip zařízení spočívá v přesném zaznamenávání a zapisování hodnot teploty, relativní vlhkosti oleje, relativní dielektrické konstanty a vodivosti kapaliny do systému. Senzor je dále spojen s programovatelným rozhraním Arduino, které je připojeno do



Obr. 4.5 3D optický profilometr Contour GT-X [33].



Obr. 4.6 Senzor stavu oleje LubCos Vis+ a H2O+ II [35].

Tab. 4.5 Technické parametry snímače stavu oleje LubCos. [35]

Parametry	Hodnota
Analogový výstup	4 až 20 <i>mA</i>
Relativní dielektrická konstanta	1 až 7
Relativní vlhkost	0 až 100 %
Vodivost	100 až 800 <i>pSm</i>
Teplota maziva	-20 až 85 °C

počítače. Na podobném principu funguje i senzor Vis+, který byl využit k měření viskozity a dielektrické konstanty. Parametry snímačů jsou uvedeny v Tabulce 4.5.

## 4.2 Materiály a příprava vzorků

Pro realizaci experimentů a jejich následné ověření bylo zapotřebí zajistit dostatečné množství různých druhů olejů, které jsou sepsány v Tabulce 4.6. Hodnoty viskozity a tlakově-viskózního koeficientu  $\alpha$  jsou uvedeny za teploty 40 °C.

Tab. 4.6 Seznam použitých olejů s jejich reologickými vlastnostmi.

Název oleje	Viskozita ( <i>Pa · s</i> )	Koeficient $\alpha$ ( <i>GPa<sup>-1</sup></i> )	Index lomu (–)	Třída olejů ISO VG + jejich klasifikace
FVA 3 (–)	0,084	* 16,94	–	100 + minerální, parafinické
FVA 4 (–)	0,4236	* 19,45	1495	460 + minerální, parafinické
CLP 220 (PARAMO)	0,182	22,3	1487	220 + minerální, převodový
Spectrasyn 6 (ExonMobil)	0,0248	14,1	1458	32 + syntetický, PAO
Intrans 220 (MOGUL)	0,1779	15,2	1466	220 + syntetický, převodový, PAO
EDGE 0W-20 (CASTROL)	0,038	12,6	1463	46 + syntetický, motorový

Tlakově-viskózní koeficienty  $\alpha$  označené „\*” byly proměřeny na vysokotlakém viskozimetru ve vědecké práci Golda [40], zatímco ostatní byly určeny pomocí základních předpokladů dle normy AGMA 925-A03 [41]. Následující příprava materiálů je rozdělena dle vzorků pro studium vlivu kontaminace částicemi, vlhkostí a degradace maziva.

### 4.2.1 Vzorky pro studium vlivu kontaminace částicemi

V této části práce byl použit minerální olej FVA 3 (Tabulka 4.6), který společně s kovovými i nekovovými částicemi utvářel zkoumanou směs. Míra kontaminace této směsi byla definována normou ISO 4406:1999 [36], zabývající se úrovní čistoty maziva. Princip vyhodnocení dle zmíněné normy spočívá v zápisu identifikačních čísel ve třech různých pozicích, kde první pozice uvádí počet částic o velikosti větší než 4  $\mu\text{m}$  obsažených v 1 *ml* kapaliny, druhá pozice o velikosti větší než 6  $\mu\text{m}$  a třetí

ISO 4406:1999 Code Chart						
Range Code	Particles per Milliliter		Particle Size	Particles per Milliliter	ISO 4406 Code Range	ISO Code
	More Than	Up To/Including				
24	80000	160000	4 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	151773	80000–160000	24
23	40000	80000	4.6 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	87210		
22	20000	40000	6 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	38363	20000–40000	22
21	10000	20000	10 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	8229		
20	5000	10000	14 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	3339	2500–5000	19
19	2500	5000	21 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	1048		
18	1300	2500	38 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	112		
17	640	1300	68 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	2		
16	320	640				
15	160	320				
14	80	160				
13	40	80	4 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	69	40–80	13
12	20	40	4.6 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	35		
11	10	20	6 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	7	5–10	10
10	5	10	10 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	5		
9	2.5	5	14 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	0.4	0.32–0.64	6
8	1.3	2.5	21 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	0.1		
7	0.64	1.3	38 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	0.0		
6	0.32	0.64	68 $\mu\text{m}_{\text{ef}}$	0.0		

Obr. 4.7 Ukázka normy ISO 4406:1999 [36].

o velikosti větší než 14  $\mu\text{m}$ . Následný zápis čísla, např. ve tvaru 18/16/15, uvádí rozsah možného počtu částic nacházejících se v oleji (Obrázek 4.7) [36].

Pro popsání a pochopení chování částic v kontaktu byly provedeny experimenty s olejem o různé úrovni čistoty maziva, a to v rozsahu kódu čistoty od hodnoty 18/18/18 do 21/21/21 pro částice o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Jednotlivé hodnoty těchto čísel určují rozsah samotného počtu částic (Obrázek 4.7), který byl na základě elementárních fyzikálních výpočtů (hmotnosti, objemu, hustoty) přepočten na hmotnost částic potřebnou pro vytvoření určité úrovně čistoty maziva (Tabulka 4.7, 4.8).

Zástupcem kovových částic je železný prášek Iron 209309 (dodavatel Sigma-Aldrich), [37] garantující velikost jednotlivých částic 40  $\mu\text{m}$  o hustotě 7,86  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Tab. 4.7 Počet a hmotnost železných částic dle ISO 4406:1999.

Kód čistoty maziva	Počet částic v 1 ml oleje	Hmotnost částic v 30 ml oleje	Zvolená hmotnost
18/18/18	1300 – 2500	0,00856 – 0,01646 g	0,012 g
19/19/19	2500 – 5000	0,01646 – 0,03292 g	0,031 g
20/20/20	5000 – 10000	0,03292 – 0,06584 g	0,062 g
21/21/21	10000 – 20000	0,06584 – 0,13169 g	0,12 g

Naopak k pozorování chování nekovových částic byl použit korundový abrazivní prášek P280 (dodavatel unitechnic.cz) [38] o velikosti částic od 30 do 60  $\mu\text{m}$  a s hustotou 4,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Velikost těchto částic byla následně ověřena na optickém profilometru s průměrnou hodnotou 40  $\mu\text{m}$ .

Tab. 4.8 Počet a hmotnost korundových částic dle ISO 4406:1999.

Kód čistoty maziva	Počet částic v 1 ml oleje	Hmotnost částic v 30 ml oleje	Zvolená hmotnost
18/18/18	1300 – 2500	0,00441 – 0,00848 g	0,006 g
19/19/19	2500 – 5000	0,00848 – 0,01696 g	0,012 g
20/20/20	5000 – 10000	0,01696 – 0,03393 g	0,031 g
21/21/21	10000 – 20000	0,03393 – 0,06786 g	0,062 g

Samotná příprava vzorků spočívala v ručním rozmíchání 30 ml oleje FVA 3 se zvolenými kontaminačními částicemi v kádince (Tabulka 4.7 a 4.8). Chování této emulze bylo následně zkoumáno na zařízení MTM.

## 4.2.2 Vzorky pro studium vlivu vlhkosti

K přípravě vzorků pro měření vlivu procentuálního zastoupení vlhkosti v oleji byl použit generátor vlhkého vzduchu a zvolen průmyslový převodový olej CLP 220 od firmy PARAMO (Tabulka 4.6), který byl zahříván (na teplotu  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) po celou dobu kontaminace.

Průběh kontaminace spočíval v pozorování vzorku maziva, u kterého se pomocí senzoru kontroloval relativní obsah vlhkosti v oleji. Po dosažení doby kontaminace 8 hodin a zároveň splnění podmínky požadované úrovně kontaminace vlhkostí byl proces zastaven a vzorek byl použit pro další měření a vyhodnocení. Cílovou úrovní vlhkosti v oleji bylo 100 %.

## 4.2.3 Vzorky pro studium vlivu oxidace

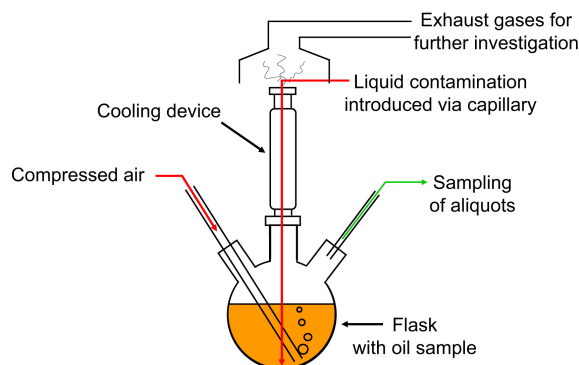
Příprava vzorků spočívala v zahřívání a probublávání oleje o objemu  $100\text{ ml}$  v jednomístném tepelném hnízdě za teploty  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  a průtoku vzduchu  $15\text{ l/h}$ . U každého oleje byly vytvořeny tři vzorky s různými intervaly oxidace, a to po 8, 16 a 24 hodinách. Za účelem zajištění bezpečnosti po celou dobu oxidační degradace byl 16hodinový interval rozdělen na dva intervaly po 8 hodinách a 24hodinový interval na dva intervaly po 12 hodinách. V této práci byly k měření připraveny čtyři druhy olejů, a to CLP 220, FVA 4, Spectrasyn 6 a Intrans 220 (Tabulka 4.6).

Pro studium oxidační degradace byl také získán vzorek maziva Castrol EDGE 0W-20, u kterého byla garantována míra oxidační degradace shodná se stavem automobilového oleje po najetí 30 000 km. Tento vzorek byl připraven modifikovanou metodou pro oxidační stabilitu maziva (Obrázek 4.8) za teploty  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , průtoku vzduchu  $10\text{ l/h}$  a po dobu 96 hodin [39]. Stav vzorku byl popsán následujícími veličinami: oxidace  $90\text{ A/cm}$ , pokles TBN až o 65 % a nárůst NN o  $8,7\text{ mg KOH/g}$ .

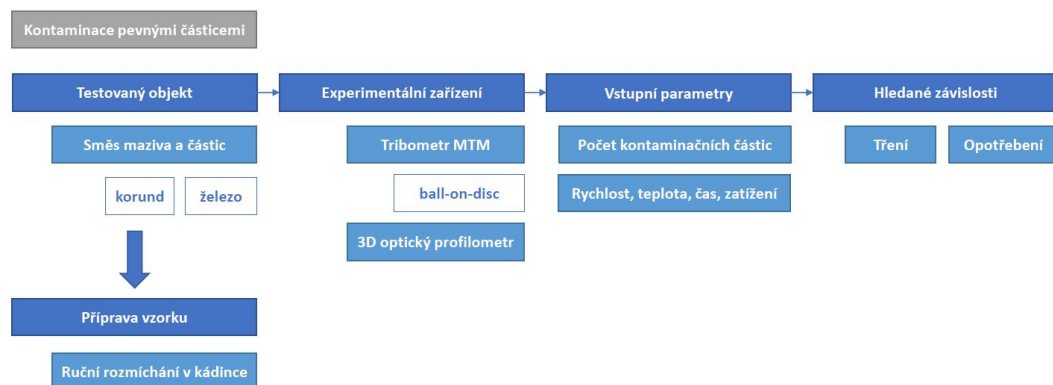
## 4.3 Postup měření a hodnocení výsledků

### 4.3.1 Kontaminace pevnými částicemi

Postup měření a následné vyhodnocení probíhaly u kovových i nekovových částic identicky (Obrázek 4.9). Připravená emulze s částicemi o zvoleném kódu čistoty maziva byla aplikována do prostoru s kuličkou a diskem na zařízení MTM.



Obr. 4.8 Postup přípravy vzorků modifikovanou metodou pro oxidační stabilitu maziva [39].



Obr. 4.9 Vývojový diagram při řešení kontaminace pevnými částicemi.

Samotný program pro měření tření se skládal ze čtyř variant, z nichž každá obsahovala jiné parametry měření pro zjištění závislosti mezi úrovní čistoty maziva, třením, zatížením a případným skluzem. Jednotlivé varianty byly provedeny celkem třikrát pro zajištění věrohodnosti měření (Tabulka 4.9). V případě měření a vyhodnocení opotřebení byl sledován stav disku po krátkém i dlouhém testování čistého a kontaminovaného oleje ve třech podmínkách rychlosti. Doba testování a rychlost byly nastaveny tak, aby u každého z měření byla uražena stejná celková dráha. Všechny testy byly nastaveny jako časové, přičemž parametry měření jsou sepsány v Tabulce 4.10. Pro každou variantu byly výsledné hodnoty opotřebení měřeny na čtyřech různých místech disku.

Změřené hodnoty byly následně vyhodnoceny v programu Excel, kde jednotlivé varianty byly zprůměrovány a porovnávány dle závislosti tření na valivé rychlosti pro čistý i kontaminovaný olej. Dále bylo využito 3D optického profilometru pro ověření způsobeného opotřebení a metody VSI s objektivem s hodnotou zvětšení 5x.

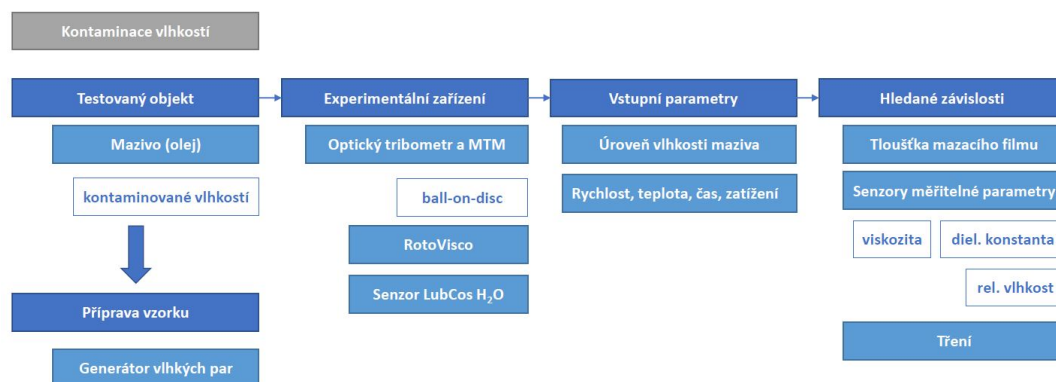
Tab. 4.9 Vstupní parametry pro měření tření v kontaktu.

Varianta měření	Valivá rychlost ( $mm \cdot s^{-1}$ )	Zatížení ( $GPa$ )	Skluz (%)
1	<0; 1000>	0,5	20
2	<0; 1000>	0,7	20
3	<0; 1000>	0,7	5
4	<0; 1000>	0,9	20

Tab. 4.10 Vstupní parametry pro měření opotřebení na tribometru MTM.

Kód čistoty maziva FVA 3	Valivá rychlost ( $mm \cdot s^{-1}$ )	Doba testu ( $min$ )	Zatížení ( $GPa$ )	Skluz (%)
Čistý olej	210	180	0,7	20
Čistý olej	735	52	0,7	20
Čistý olej	1000	37	0,7	20
21/21/21 (korund)	210	180	0,7	20
21/21/21 (korund)	735	52	0,7	20
21/21/21 (korund)	1000	37	0,7	20
21/21/21 (železo)	150	262	0,7	20
21/21/21 (železo)	400	90	0,7	20
21/21/21 (železo)	1000	37	0,7	20





Obr. 4.10 Vývojový diagram při řešení kontaminace vlhkostí.

### 4.3.2 Kontaminace vlhkostí

Po přípravě vzorků bylo nutné ověřit, zdali se vlivem kontaminace oleje změnily reologické vlastnosti, či nikoliv (Obrázek 4.10). K tomu bylo využito zmíněné zařízení RotoVisco, které určilo viskozitu výsledné směsi. Metoda určení viskozity byla v programu nastavena tak, aby pomocí osmi lineárních kroků prošla smykové spády pro hodnoty od 10 do 200  $s^{-1}$  s fixní dobou 5 s pro každý krok, a to za teploty 40 °C. U každého vzorku proběhlo měření třikrát a výsledky byly zprůměrovány.

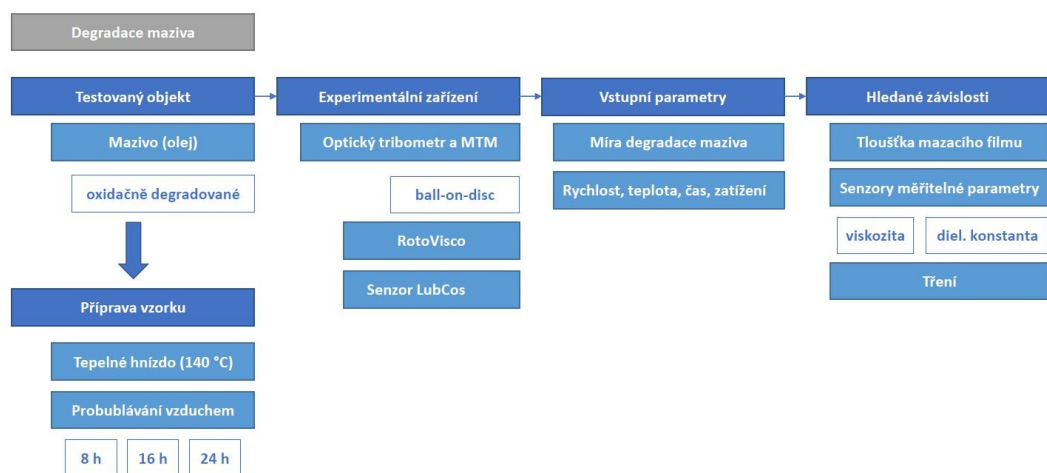
Průběh měření na samotném optickém tribometru byl prováděn obvyklým způsobem, tj. mezi disk a kuličku bylo aplikováno dostatečné množství oleje, ustanovil se kontakt a začal se vyhřívat na 40 °C. Po dosažení teploty byly pořízeny kalibrační snímky a byl zajištěn požadovaný kontaktní tlak 0,5 či 0,7 GPa. V každém kroku sekvence byla pozice kuličky a disku nasnímána třikrát, vždy jednou za 3 sekundy, aby bylo docíleno reprezentativních snímků pro danou tloušťku mazacího filmu. Relativní rychlosti kuličky a disku pro olej CLP 220 jsou uvedeny v Tabulce 4.11. Nezbytným krokem pro stanovení tloušťky mazacího filmu bylo zjištění indexu lomu příslušného oleje. To bylo provedeno pomocí refraktometru standardní konstrukce. Mimo měření tloušťky mazacího filmu bylo vyhodnoceno tření, a to způsobem popsaným v Tabulce 4.9. Tento postup byl proveden pro olej čistý i kontaminovaný, s procentuálním zastoupením vlhkosti 100 %.

### 4.3.3 Oxidační degradace

Obdobně jako u kontaminace vlhkostí je nutné nejprve zjistit reologické vlastnosti degradovaných olejů (Obrázek 4.11). To bylo provedeno pro všechny vzorky oleje, čisté i degradované, za stejných podmínek měření jako v Kapitole 4.3.2. Samotné měření a vyhodnocení tloušťky mazacího filmu (Tabulka 4.11) i tření (Tabulka 4.9) bylo provedeno stejným způsobem.

Tab. 4.11 Sekvenční rychlosti olejů CLP 220, FVA 4, Spectrasyn 6, Intrans 220 a EDGE 0W-20.

Olej	Parametry	Hodnoty
CLP 220	Sekvenční rychlosti	10, 15, 20, 35, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 600 $mm \cdot s^{-1}$
FVA 4	Sekvenční rychlosti	10, 15, 20, 35, 50, 70, 90, 130, 170, 190, 220, 250 $mm \cdot s^{-1}$
Spectrasyn 6	Sekvenční rychlosti	150, 200, 300, 450, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 2000, 2600 $mm \cdot s^{-1}$
Intrans 220	Sekvenční rychlosti	20, 35, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 550, 700 $mm \cdot s^{-1}$
EDGE 0W-20	Sekvenční rychlosti	150, 200, 300, 450, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 2000, 2600 $mm \cdot s^{-1}$



Obr. 4.11 Vývojový diagram při řešení degradace maziva.



## 5 VÝSLEDKY

Ve výsledcích této práce jsou zahrnuty závislosti jednotlivých kontaminačních a degradačních vlivů na reálně diagnostikovatelné veličiny. Obdobně jako předchozí kapitoly jsou i výsledky této práce rozděleny na podkapitoly zabývající se vlivem pevných částic, vlhkosti a oxidační degradace na chování mazacího filmu.

### 5.1 Vliv pevných částic na tření a opotřebení

V případě zkoumání vlivu kontaminace pevnými částicemi na tření byly použity částice korundu a železa. Jednotlivé závislosti tření byly přitom porovnávány s predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu dle Hamrocka a Dowsona, jakož i s parametrem mazání  $\lambda$ . Tato pomocná kritéria byla zvolena tak, aby bylo možné při daném tření rozhodnout o druhu mazání.

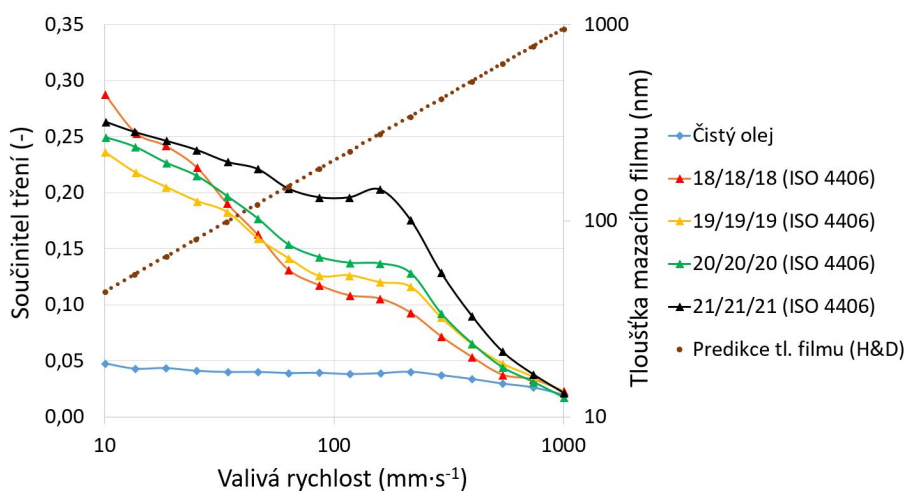
#### 5.1.1 Vliv částic korundu na tření a opotřebení

Na základě výsledků zobrazených v následujících grafech lze soudit, že rychlost odvalovacích povrchů a kód čistoty maziva zásadně ovlivňují součinitel tření a vznikající opotřebení. Tyto zkoumané parametry lze také porovnávat s predikovanou tloušťkou vznikajícího mazacího filmu, neboť ta vychází z rychlosti v kontaktu.

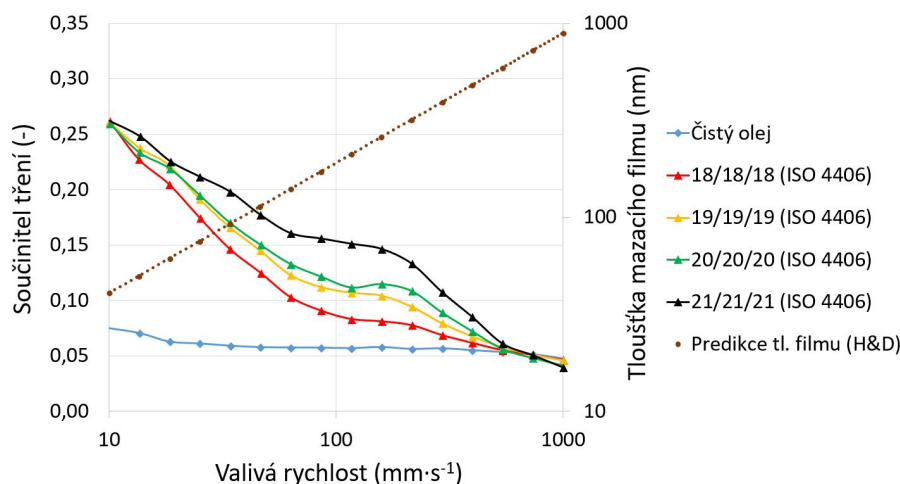
#### Výsledky popisující tření v kontaktu

Vyhodnocené závislosti tření na rychlosti a predikované tloušťce mazacího filmu jsou zobrazeny na Obrázcích 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4. Podmínky pro měření a vyhodnocení byly v rámci těchto experimentů stejné, lišily se pouze v zadávaném tlaku.

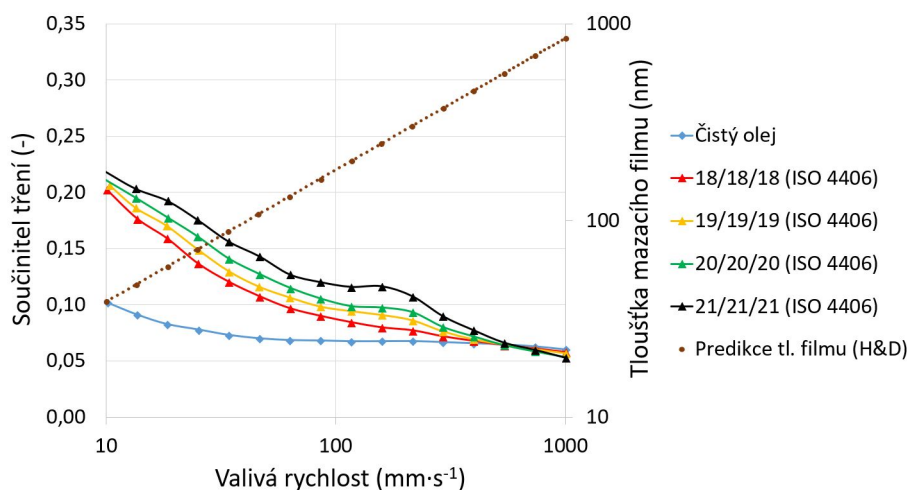
Prvním důležitým poznatkem byl značný rozdíl v tření mezi čistým a kontaminovaným olejem. Jednotlivé úrovně čistoty maziva měly přitom zásadní vliv na průběh tření, které rostlo se zvyšujícím se počtem kontaminačních částic v mazivu, a to zejména při malých až středních rychlostech ( $0$  až  $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ).



**Obr. 5.1** Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti  $40 \mu\text{m}$ . Tlak  $0,5 \text{ GPa}$ , skluz  $20 \%$ .



**Obr. 5.2** Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Tlak 0,7  $\text{GPa}$ , skluz 20 %.

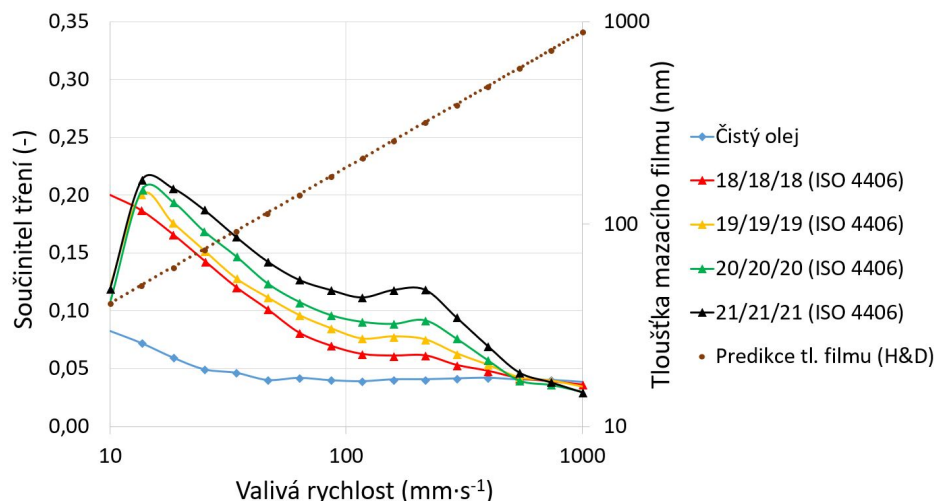


**Obr. 5.3** Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Tlak 0,9  $\text{GPa}$ , skluz 20 %.

Druhým poznatkem bylo, že při překročení určité limitní hodnoty rychlosti docházelo u všech úrovní čistoty maziva k poklesu tření v takové míře, že se naměřená data blížila hodnotám čistého oleje. Tento pokles tření je odůvodňován nárůstem tloušťky mazacího filmu, díky kterému mohou částice snadněji procházet kontaktní oblastí.

Třetí získaná znalost se týká závislosti zadaného tlaku na průběhu tření. Z naměřených hodnot plyne, že s nárůstem tlaku o 0,2  $\text{GPa}$  se tření zmenší až o 25 % oproti výchozí hodnotě. Největší rozdíly jsou zaznamenány zejména u směsí s větším obsahem částic korundu. Tento jev lze chápat tak, že rostoucí tlak v kontaktu vytváří na vstupu podmínky, které jsou z pohledu částice energeticky nevýhodné, a tudíž je pro částici výhodnější do kontaktu nevstupovat, ale pouze jej obcházet.

V neposlední řadě bylo provedeno měření pro ověření závislosti jednotlivých úrovní čistoty na tření při změně skluzu. To je zobrazeno na Obrázku 5.4, který je snadno porovnatelný s Obrázkem 5.2, neboť má stejné rychlostní i tlakové parametry a liší se pouze v hodnotě skluzu. Výsledná data jasně ukazují pokles tření se



Obr. 5.4 Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti  $40\ \mu\text{m}$ . Tlak  $0,7\ \text{GPa}$ , skluz  $5\ \%$ .

zmenšující se hodnotou skluzu, a to opět zejména při nízkých až středních valivých rychlostech.

### Výsledky popisující opotřebení

Jednotlivé podmínky pro zkoumání opotřebení (tlak  $0,7\ \text{GPa}$  a skluz  $20\ \%$ ) byly zvoleny na základě výsledků tření. Celkem byly provedeny tři konfigurace měření pro čistý a tři pro kontaminovaný olej s kódem čistoty maziva 21/21/21 (Tabulka 5.1). Uvedené opotřebení pro čistý olej bylo natolik nízké, že vznikaly komplikace při jeho samotném měření a vyhodnocení, a tudíž lze toto opotřebení považovat za zanedbatelné. Výsledky měření opotřebení čistého oleje jsou také zobrazeny na Obrázku 5.5.

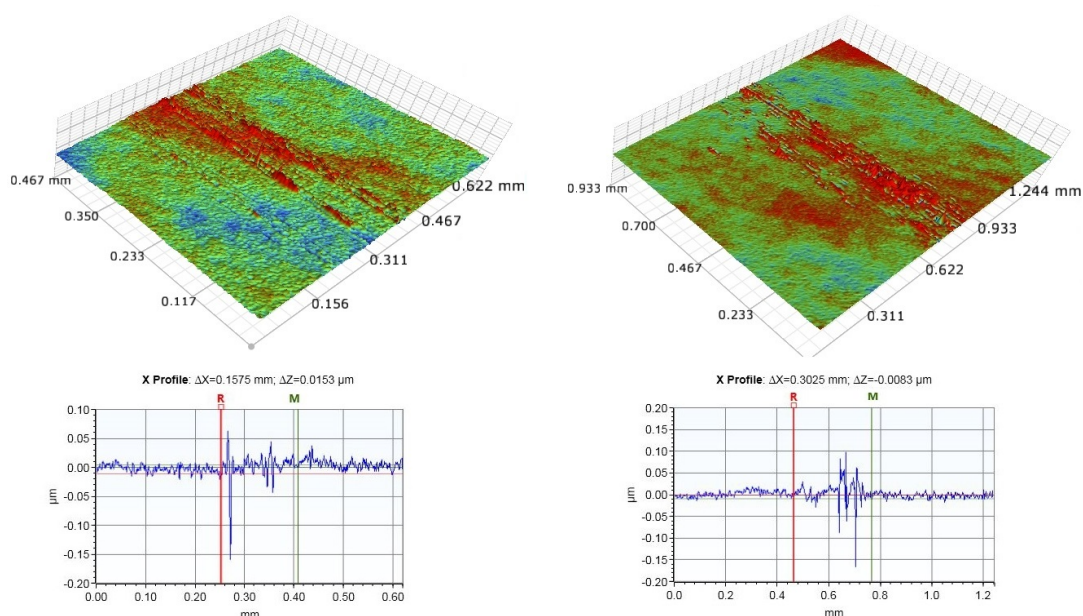
Profily a řezy potvrzují zanedbatelnou hodnotu opotřebení (Obrázek 5.5), jenž bylo způsobeno odvalováním kuličky a disku za použití čistého oleje FVA 3. Pozorovatelné rýhy na disku byly způsobeny zejména v prvních pracovních cyklech při záběhu zařízení.

Opotřebení vzniklé měřením za použití maziva o kódu čistoty 21/21/21 je oproti čistému mazivu snadno měřitelné. Vyhodnocené profily (Obrázek 5.6) mají jasné viditelnou stopu kontaktu, ve kterém bylo poškození způsobeno abrazivními účinky tvrdých částic korundu.

Pro výpočet celkové hodnoty opotřebení byly na 3D optickém profilometru pořízeny čtyři snímky, přičemž každý z nich reprezentoval danou pozici na disku. Poté byla programem vypočítána průměrná hloubka a šířka stopy, ručně změřen její prů-

Tab. 5.1 Podmínky pro měření opotřebení s uvedením výsledných hodnot (částice korundu).

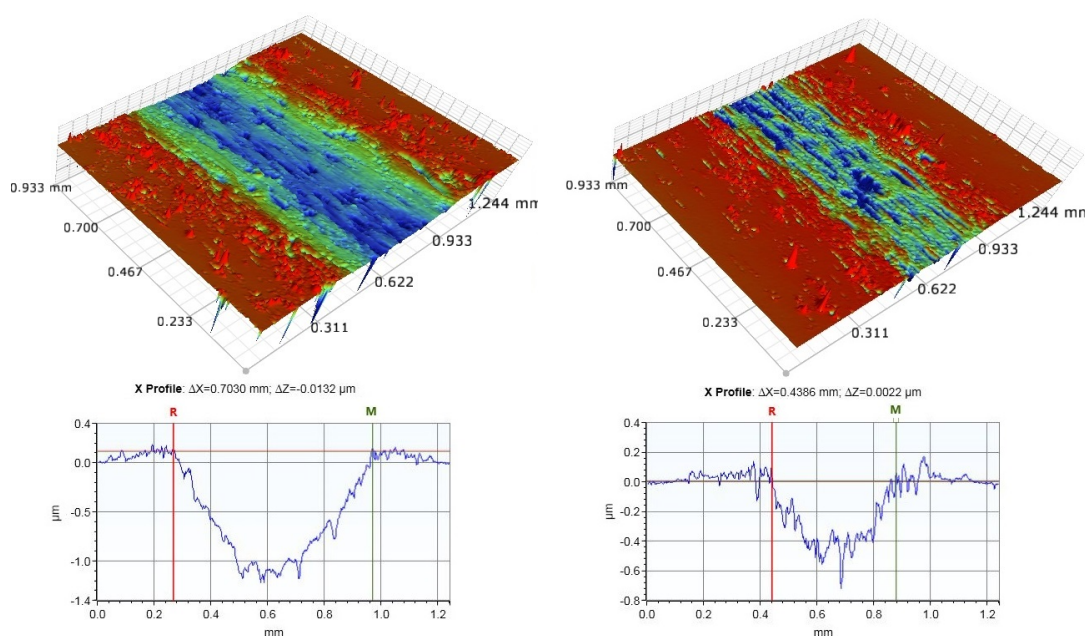
Kód čistoty maziva FVA 3	Rychlost ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Doba trvání testu ( $\text{min}$ )	Vzniklé opotřebení ( $\text{mm}^3$ )
Čistý olej	210	180	0,0000294
	735	52	0,0000466
	1000	37	0,0000262
21/21/21 (částice korundu)	210	180	0,0659
	735	52	0,0224
	1000	37	0,0189



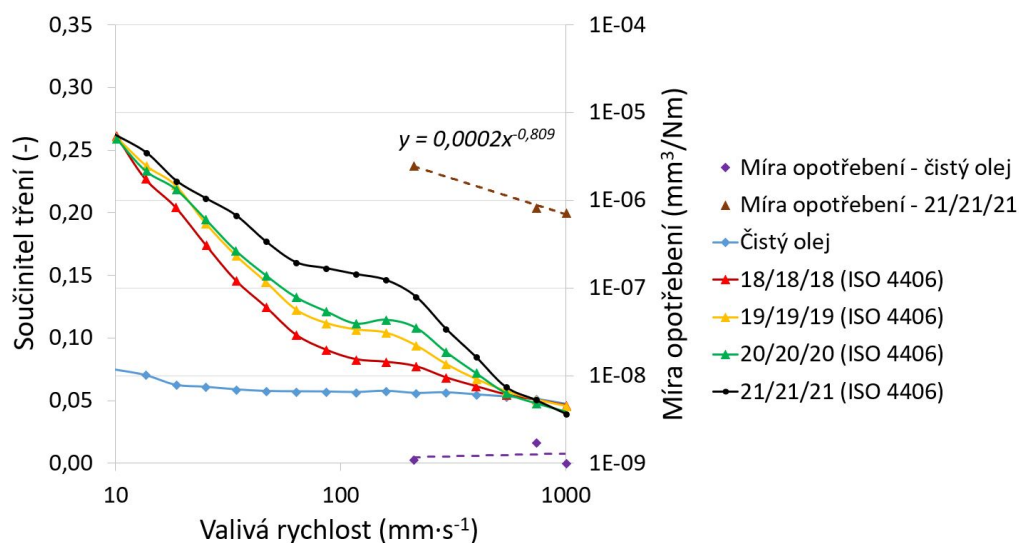
**Obr. 5.5** Pohled na profil a řez opotřebeného povrchu disku pro čistý olej za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnižší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo.

měr a pomocí elementárních vzorců vypočten objem odebraného materiálu, jenž je uveden v Tabulce 5.1.

Z výsledků vyplývá, že s rostoucí rychlostí klesá hodnota opotřebení, a to i přesto, že celková uražená dráha při všech konfiguracích měření byla stejná. Tyto tabulkové hodnoty byly dále pro přehlednost porovnány s rychlostí a průběhem tření za stejných podmínek (Obrázek 5.12). Vypočtené hodnoty opotřebení byly v grafu proloženy mocninnou funkcí, která je popsána rovnicí  $y = 0,0002x^{-0,809}$ .



**Obr. 5.6** Pohled na profil a řez opotřebeného povrchu disku pro kontaminovaný olej s částicemi korundu (kód čistoty maziva 21/21/21) za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnižší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo.



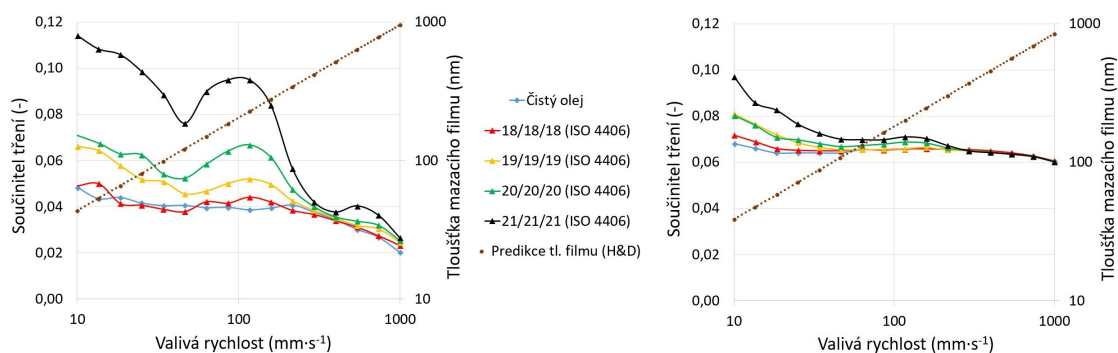
Obr. 5.7 Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem, doplněný o závislost na opotřebení. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti  $40\ \mu\text{m}$ . Tlak  $0,7\ \text{GPa}$ , skluz  $20\ \%$ , kód čistoty 21/21/21.

### 5.1.2 Vliv částic železa na tření a opotřebení

Obdobně jako u kontaminace částicemi korundu, i částice železa ovlivňují součinitel tření a vznikající opotřebení. Měření a způsob náležitého vyhodnocování se od předchozí kapitoly příliš neliší.

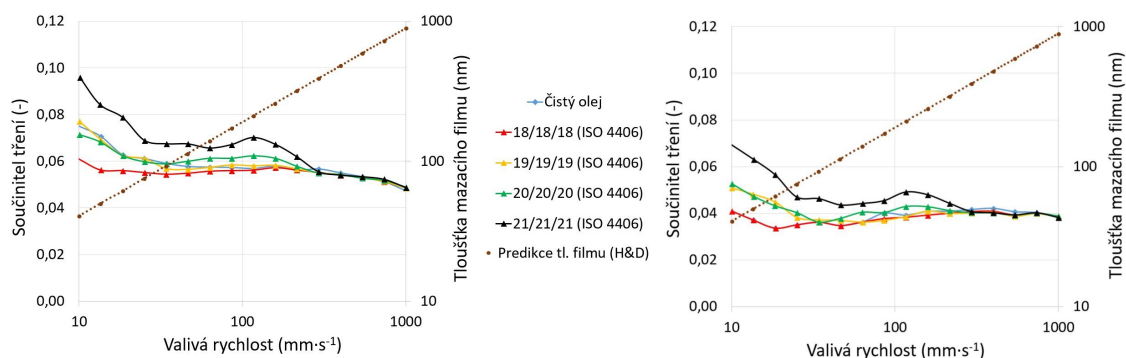
#### Výsledky popisující tření v kontaktu

V této podkapitole se dospělo ke stejným poznatkům jako u výsledků pro tření v kontaktu se směsí maziva a částicemi korundu. I přesto, že je trend zachován, dochází u průběhu tření, zobrazeného na Obrázcích 5.8 a 5.9, k rychlejšímu poklesu naměřených hodnot při malých a středních valivých rychlostech. To lze pozorovat na průběhu tření při tlaku  $0,9\ \text{GPa}$  (Obrázek 5.8), kde se hodnoty tření jednotlivých kódů čistoty maziva velmi podobají hodnotám čistého oleje již při malých rychlostech a od středních rychlostí se hodnoty zcela shodují. Trend, u něhož hodnota tření klesá se snížením velikosti skluzu, se v této kapitole také podařilo ověřit (Obrázek 5.9).



Obr. 5.8 Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic železa o velikosti  $40\ \mu\text{m}$ . Skluz  $20\ \%$ . Vlevo tlak  $0,5\ \text{GPa}$ , vpravo tlak  $0,9\ \text{GPa}$ .





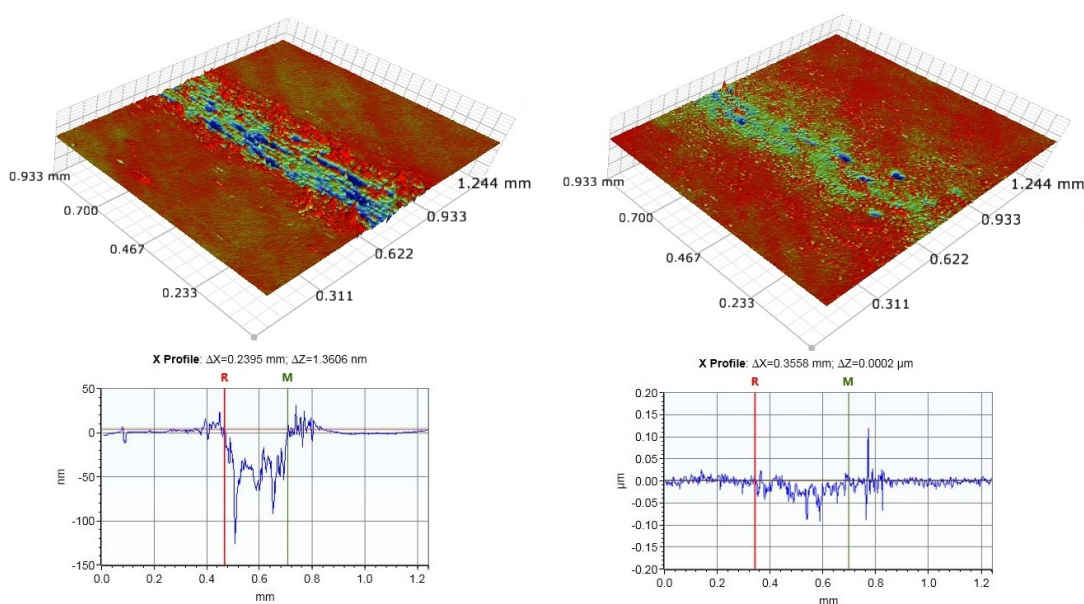
**Obr. 5.9** Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic železa o velikosti  $40\ \mu\text{m}$ . Tlak  $0,7\ \text{GPa}$ . Vlevo skluz 20 %, vpravo skluz 5 %.

### Výsledky popisující opotřebení

Vzhledem k výsledkům pro průběh tření se dalo očekávat nižší opotřebení než u konfigurace s částicemi korundu, neboť hodnoty tření jsou obecně nižší a jeho nejvyšší hodnoty se vyskytují při nižších valivých rychlostech. Díky těmto znalostem byly upraveny i podmínky pro testování opotřebení na zařízení MTM (Tabulka 5.2).

Porovnáním jednotlivých profilů a řezů ocelových disků získáme informace o způsobu a průběhu opotřebení (Obrázek 5.10). U naměřených dat se potvrdilo, že celkové vzniklé opotřebení je menší než u částic korundu. Pokles celkového odebraného materiálu je odůvodňován tím, že částice železa jsou mnohem měkčí, a tudíž při průchodu kontaktem nemají tendenci způsobovat abrazivní opotřebení, ale spíše se elasticky deformovat.

Ze snímků profilů a také z Obrázku 5.11 lze vyčíst, že opotřebení je způsobováno adhezí částic železa. Tyto částice při průchodu kontaktem přilnou vlivem tlaku k povrchu odvalovacích součástí, následně se vlivem proudící směsi a přitlaku v kontak-



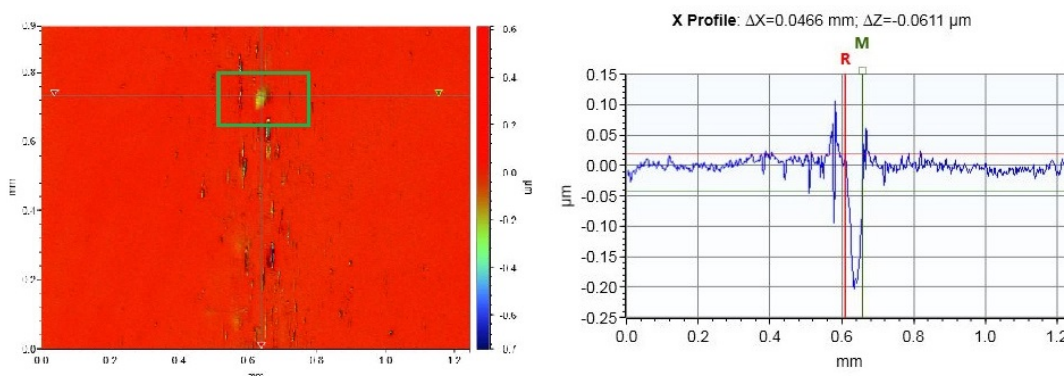
**Obr. 5.10** Pohled na profil a řez opotřebovaného povrchu disku pro olej kontaminovaný částicemi korundu (kód čistoty maziva 21/21/21) za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnížší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo.

tu odtrhnou a z kontaktu odchází. Na Obrázku 5.11 vpravo je možné vidět rozměry důlků, které byly způsobeny adhezí částic železa a jejichž velikosti také odpovídají.

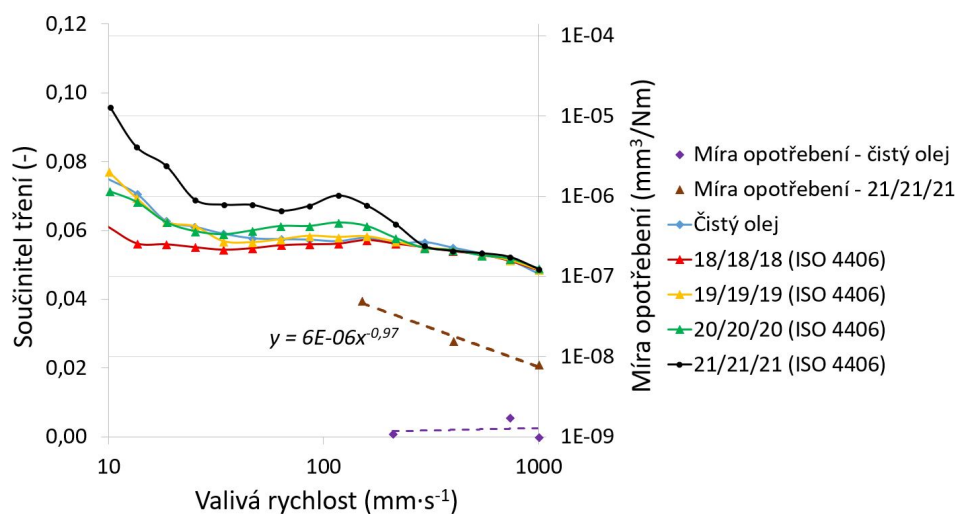
Naměřená data opotřebení byla opět porovnána s vyhodnoceným průběhem tření a s rychlostí (Obrázek 5.12). Tímto měřením se podařilo ověřit průběh opotřebení, který je popsán velmi podobnou mocninnou funkcí jako u opotřebení částicemi korundu. Rovnice průběhu je ve tvaru  $y = 0,1462x^{-0,96}$ .

**Tab. 5.2** Podmínky pro měření opotřebení s uvedením výsledných hodnot (částice železa).

Kód čistoty maziva FVA 3	Rychlost ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Doba trvání testu ( $\text{min}$ )	Vzniklé opotřebení ( $\text{mm}^3$ )
Čistý olej	210	180	0,0000294
	735	52	0,0000466
	1000	37	0,0000262
21/21/21 (částice železa)	150	252	0,00129
	400	94	0,00039
	1000	37	0,00021



**Obr. 5.11** Pohled na profil a řez opotřebovaného povrchu disku pro olej kontaminovaný s částicemi železa (kód čistoty maziva 21/21/21) za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnížší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo.



**Obr. 5.12** Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem, doplněný o závislost na opotřebení. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti  $40 \mu\text{m}$ . Tlak  $0,7 \text{ GPa}$ , skluz  $20 \%$ , kód čistoty 21/21/21.

## 5.2 Vliv obsahu vody v oleji na chování mazacího filmu

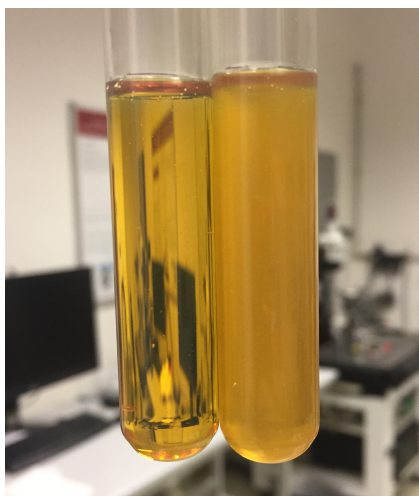
V rámci stanovení závislosti mezi obsahem vody v oleji a parametry mazacího filmu, jako je jeho tloušťka, viskozita, tření či relativní vlhkost, byl použit generátor vlhkých par. Na Obrázku 5.13 si lze povšimnout rozdílu mezi čistým a kontaminovaným olejem, kdy pro čistý olej byla naměřena senzorem Vis+ relativní vlhkost 35 % a pro kontaminovaný olej 100 %.

Veškeré výsledky byly zaneseny do grafů či tabulek, načež naměřená tloušťka mazacího filmu a tření byly u čistého i kontaminovaného oleje porovnávány s predikční hodnotou tloušťky filmu dle Hamrocka a Dowsona.

### 5.2.1 Změna viskozity a dielektrické konstanty vlivem kontaminace vlhkým vzduchem

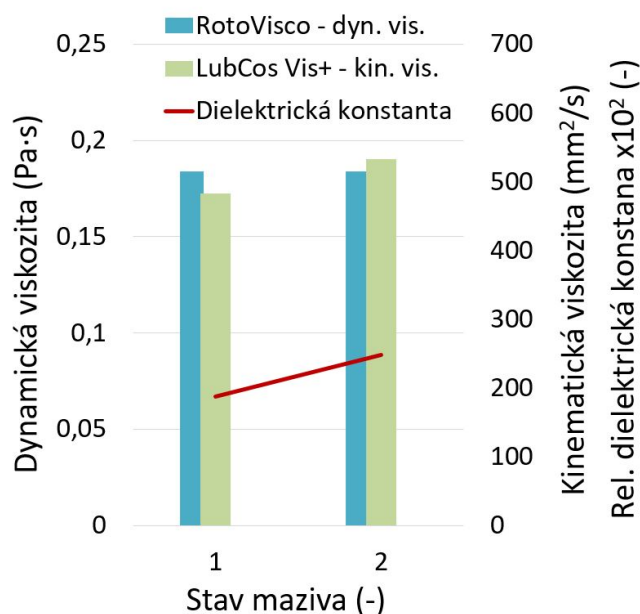
Vyhodnocené závislosti viskozity a dielektrické konstanty na míře kontaminace maziva jsou zobrazeny na Obrázku 5.14. K získání těchto hodnot byly použity zařízení RotoVisco, kterým byla měřena dynamická viskozita maziva při 40 °C, a senzor LubCos Vis+, pomocí kterého byly získány hodnoty kinematické viskozity, relativní dielektrické konstanty a vlhkosti při pokojové teplotě.

U dynamické viskozity došlo k minimální změně hodnot, zatímco u kinematické viskozity je možné sledovat znatelný rozdíl. Tato odchylka může být vysvětlována několika důvody. Jedním z nich může být způsob, jakým vyhodnocovací zařízení pracují. RotoVisco funguje na principu rotačního viskozimetru, u kterého se během testu pomocí torzního senzoru měří rozdíl smykových napětí, podle nichž je stanovena hodnota viskozity. Vzhledem k získaným hodnotám lze předpokládat, že obsah vody v oleji neměl vliv na výslednou změnu dynamické viskozity. Zatímco podstata zařízení RotoVisco je mechanická, u senzoru LubCos Vis+ se provádí měření viskozity elektronicky s využitím akustického snímače povrchových vln [42]. U něho je ale třeba zdůraznit, že v důsledku jeho měřicího principu mohou být získány různé



Obr. 5.13 Porovnání čistého (vlevo) a kontaminovaného (vpravo) oleje vlhkostí (CLP 220).





**Obr. 5.14** Porovnání naměřené viskozity a dielektrické konstanty pro čistý olej a olej kontaminovaný vlhkostí. Stav 1 – čistý olej, stav 2 – kontaminovaný olej, viz Obrázek 5.13.

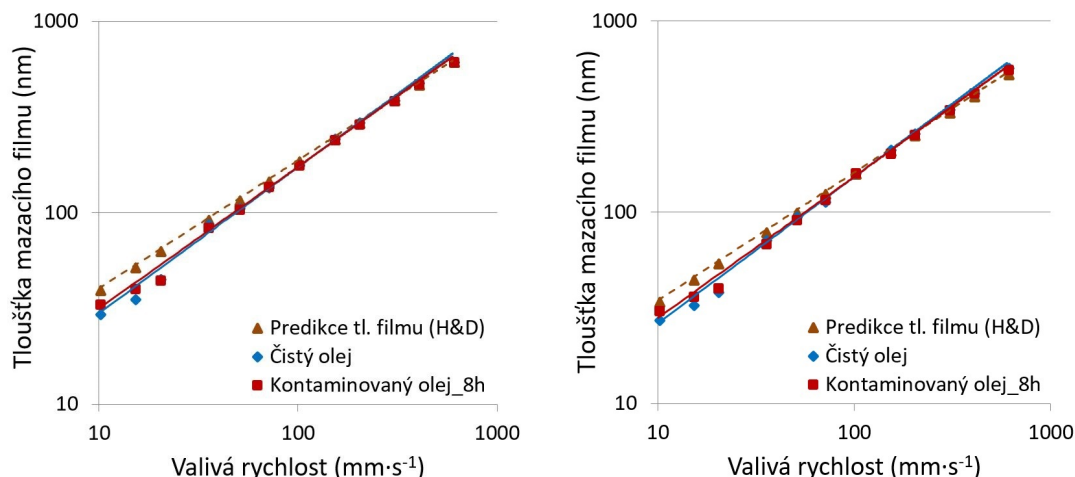
výsledky. To může nastat v případech, kdy je v bezprostřední blízkosti senzoru nečistota či jakýkoliv jiný druh kontaminace. Aplikace těchto senzorů je tudíž určena pro systémy se zajištěným průtokem oleje o určitých rychlostech, kterých v rámci laboratorního vybavení nebylo možné docílit. V neposlední řadě se tyto senzory užívají ke sledování změn v oleji, které se následně porovnávají s referenční hodnotou čistého maziva.

V rámci měřitelných parametrů byl u použitého snímače zaznamenán vliv obsažené vlhkosti na změnu relativní dielektrické konstanty (Obrázek 5.14), která vzrostla s vyšší mírou kontaminace maziva.

## 5.2.2 Vliv kontaminace vlhkým vzduchem na tloušťku mazacího filmu

V této podkapitole je popsán vliv kontaminace maziva vlhkostí na tloušťku mazacího filmu. U vyhodnocených dat (Obrázek 5.15) lze pozorovat, že vlivem kontaminace maziva vlhkostí nedošlo k pozorovatelné změně tloušťky mazacího filmu, a to ani při vyšším kontaktním tlaku. Dále je viditelné, že při nižších valivých rychlostech dochází oproti predikci k mírnému poklesu tloušťky filmu, přičemž tento rozdíl nelze jednoznačně zdůvodnit. Jednou z příčin může být nedostatečné utvoření mazacího filmu vlivem obsažené vody v prvních pracovních cyklech (tzv. hladovění) či nepřesné stanovení parametrů při výpočtu tlakově-viskózního koeficientu  $\alpha$  dle AGMA 925-A03 [41], neboť tyto hodnoty nebývají striktně pro každý olej uváděny. Tím může dojít k odchylkám mezi predikčními vztahy a reálně naměřenými hodnotami.

I přesto, že kontaminovaný olej zjevně vykazoval známky vody, které potvrdil i snímač vyhodnocující dielektrickou konstantu, v rámci navržených experimentů se nepodařilo potvrdit vliv obsahu vody na změnu tloušťky mazacího filmu.



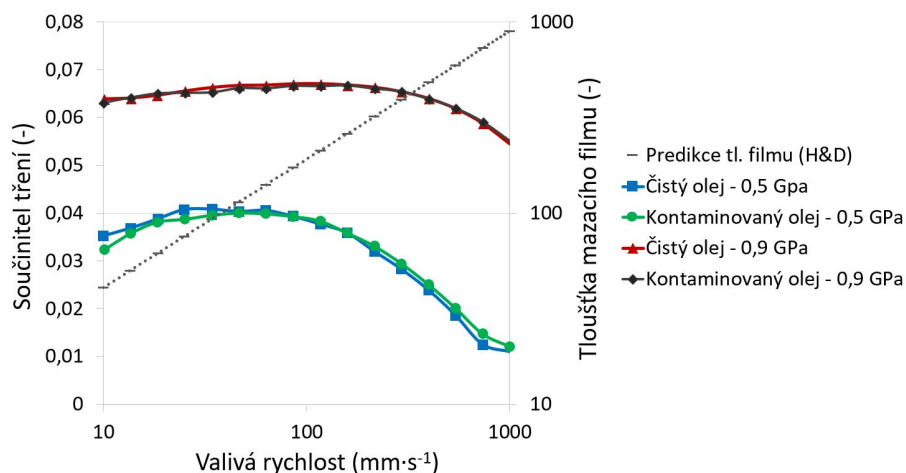
Obr. 5.15 Průběh experimentálně naměřených hodnot tloušťky mazacího filmu pro čistý olej a olej kontaminovaný vlhkým vzduchem. Hodnoty byly porovnány s predikcí dle Hamrocka a Dowsona. Pro graf vlevo platí podmínky tlaku  $0,5 \text{ GPa}$ , skluz  $0 \%$  a vpravo tlak  $0,7 \text{ GPa}$ , skluz  $0 \%$ .

### 5.2.3 Vliv kontaminace vlhkostí na tření

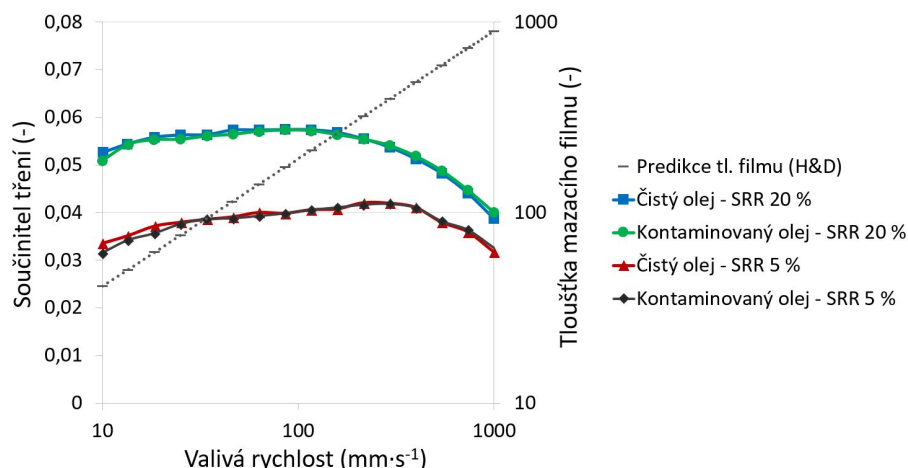
Podmínky pro zkoumání tření u oleje kontaminovaného vlhkostí byly stejné jako v případě popsaném v Kapitole 4.3.

Ve výsledcích lze pozorovat obdobné trendy, které se podařilo získat i při měření vlivu kontaminace pevnými částicemi na tření a opotřebení. První získanou znalostí je, že s rostoucí valivou rychlostí povrchu a tloušťkou mazacího filmu klesá tření (Obrázek 5.16). Dále, že se zvyšujícím se kontaktním tlakem se snižují rozdíly v hodnotách tření mezi nízkými a vysokými rychlostmi.

Druhým získaným poznatkem je, že s rostoucím tlakem v kontaktu se zvyšuje i průměrná hodnota tření, a to při všech rychlostech. Pozorovatelný je mimo jiné i vliv skluzu na změnu průběhu tření, jehož hodnoty jsou obecně nižší a s nepravidelným průběhem (Obrázek 5.17).



Obr. 5.16 Porovnání tření čistého a kontaminovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. V grafu je uvedeny průběh tření při tlaku  $0,5$  a  $0,9 \text{ GPa}$  za skluzu  $20 \%$ .



**Obr. 5.17** Porovnání tření čistého a kontaminovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. V grafu je uveden průběh tření při tlaku 0,7 GPa a skluzu 5 a 20 %.

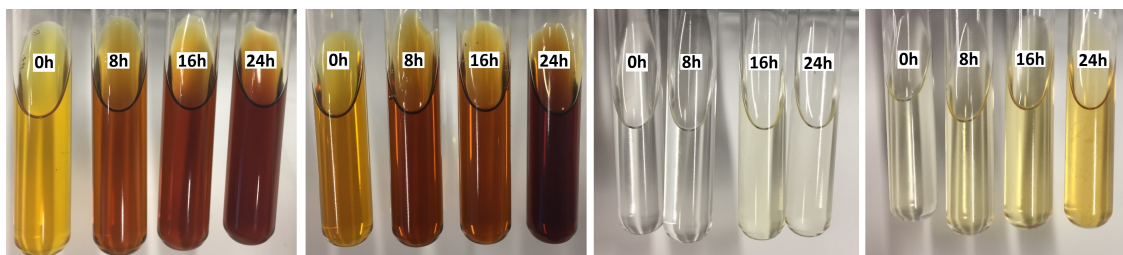
Třetí získanou znalostí je viditelný rozdíl ve tření mezi čistým a kontaminovaným olejem (Obrázek 5.16), a to při středních i vyšších rychlostech. V důsledku toho lze konstatovat, že obsah vody má jistý vliv na průběh tření, ovšem pouze při tlaku 0,5 GPa, skluzu 20 % a zmíněné míře kontaminace maziva.

### 5.3 Vliv oxidační degradace maziva na stav a chování mazacího filmu

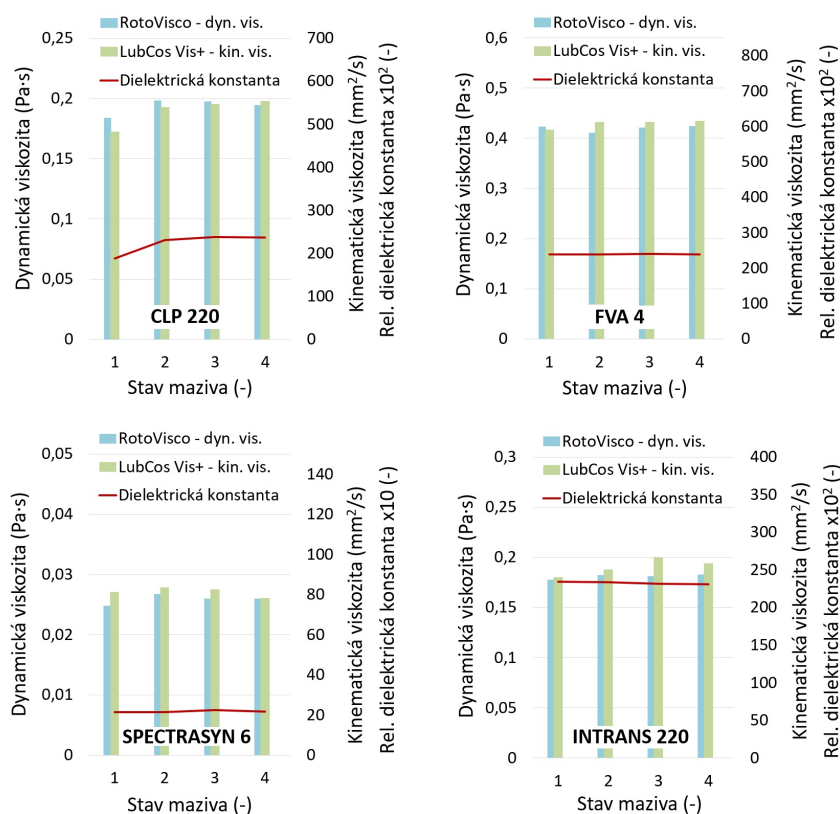
Pomocí modifikované metody pro oxidační stabilitu maziva byly ze zástupců syntetických, minerálních, základových a plně aditivovaných olejů připraveny vzorky o různé úrovni degradace maziva, které jsou zobrazeny na Obrázku 5.18.

#### 5.3.1 Vliv oxidační degradace na změnu viskozity a dielektrické konstanty

V souladu s podmínkami stanovenými pro měření, jakož i vyhodnocení viskozity a dielektrické konstanty u čistých i degradovaných olejů byly vytvořeny následující grafické závislosti (Obrázek 5.19).



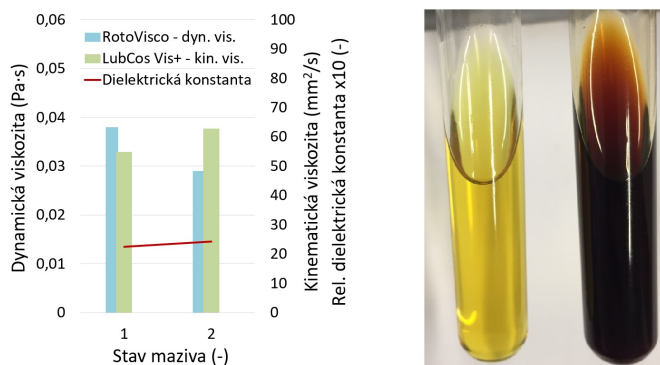
**Obr. 5.18** Ukázka čistých a oxidačně degradovaných olejů, seřazených dle doby, po kterou maziva podléhala oxidační degradaci. Zleva jsou postupně zobrazeny vzorky maziva CLP 220, FVA 4, SPECTRASYN 6 a INTRANS 220.



**Obr. 5.19** Porovnání viskozity a dielektrické konstanty čistých a oxidačně degradovaných olejů (CLP 220, INTRANS 220, FVA 4 a SPECTRASYN 6). Stav 1 – čistý olej, stav 2 – po 8 hod. degradace, stav 3 – po 16 hod. degradace, stav 4 – po 24 hod. degradace.

Na zpracovaných datech lze pozorovat trend změny viskozity a dielektrické konstanty s rostoucí mírou degradace maziva, a to zejména u maziv aditivovaných. Celková změna viskozity je ovšem vzhledem k míře degradace, jež je popsána změnou relativní dielektrické konstanty (Obrázek 5.19), poměrně nízká, a to i přesto, že optické vlastnosti olejů se drasticky změnily.

Z toho vyplývá poznatek, že změna zabarvení olejů není vhodným indikátorem stavu maziva a nelze pomocí ní rozhodnout o jeho aktuální kondici. Tyto předpoklady budou následně ověřeny pomocí experimentů zabývajících se tloušťkou mazacího filmu a třením.



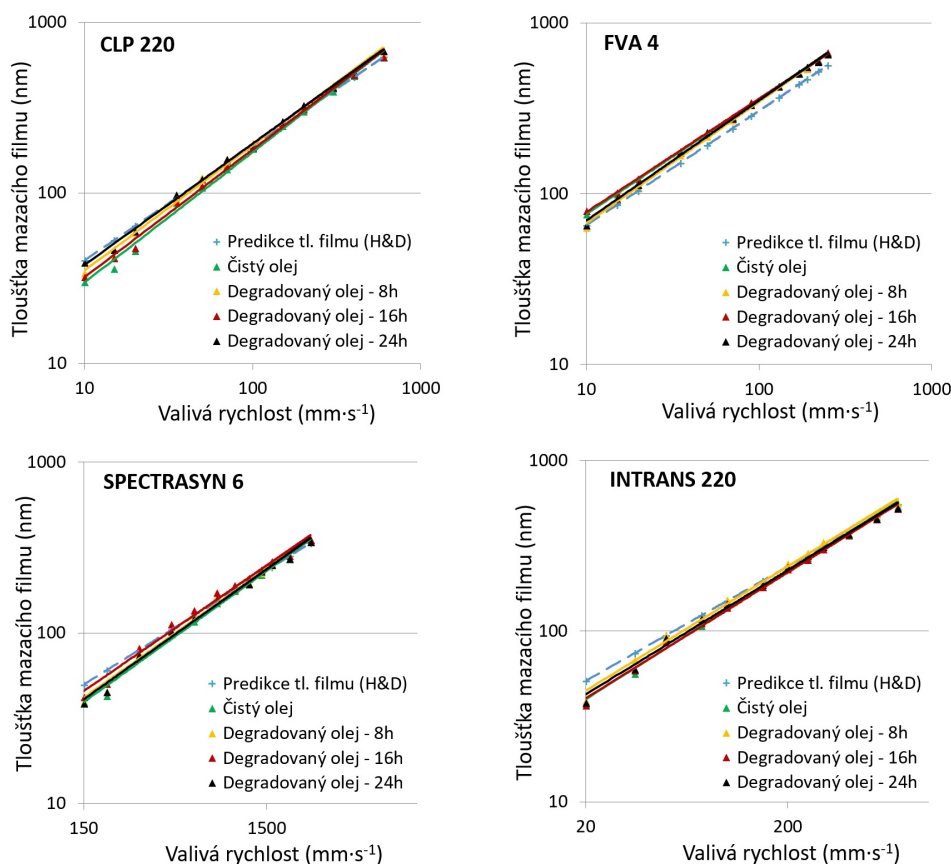
**Obr. 5.20** Porovnání čistého a degradovaného oleje EDGE 0W-20 z hlediska viskozity a dielektrické konstanty. Stav 1 – čistý olej, stav 2 – po 96 hod. degradace.

Výsledky vytvořené modifikovanou metodou pro stanovení oxidační stability maziva za teploty  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  se mohou jevit jako nedostačující pro pochopení komplexní problematiky oxidační degradace a závislosti mezi jednotlivými parametry. Proto byla v rámci diplomové práce zajištěna příprava vzorku za teploty  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 96 hodin, která garantovala míru oxidační degradace odpovídající stavu automobilového oleje, na kterém bylo najeto 33 000 km (Obrázek 5.20).

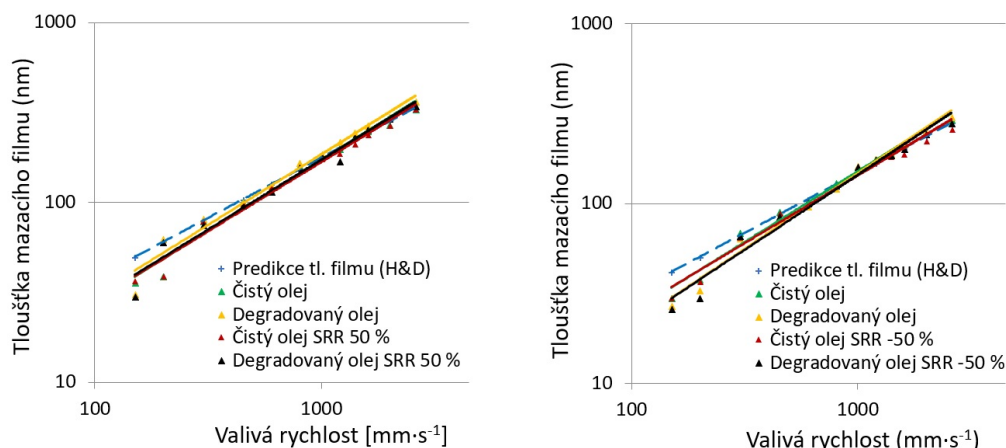
Znalostí získaných z takto připravených vzorků je několik. Na Obrázku 5.20 lze pozorovat značný pokles dynamické viskozity, který nevykazoval ani jeden z předchozích degradovaných olejů. Oproti poklesu dynamické viskozity, kinematická viskozita nepatrně narostla. Tento jev je odůvodňován tím, že degradované mazivo se za statických podmínek jeví jako vyhovující, ovšem při jeho smykovém zatěžování se jeho nedostatky projeví.

### 5.3.2 Vliv oxidační degradace maziva na tloušťku mazacího filmu

Vlivu oxidační degradace maziva na tloušťku mazacího filmu byla věnována zvláštní pozornost, neboť tento vliv je jedním z rozhodujících parametrů popisujících schopnost oleje oddělit od sebe dva třecí povrchy. U každého ze zmiňovaných olejů bylo provedeno měření tloušťky filmu při tlaku  $0,5\text{ GPa}$  a skluzem  $-50, 0$  a  $50\text{ }\%$ .



**Obr. 5.21** Porovnání vypočtené predikční hodnoty pro tloušťku mazacího filmu s experimentálně naměřenými daty čistého a oxidačně degradovaného oleje CLP 220, FVA 4, SPECTRASYN 6 a INTRANS 220. Tlak  $0,5\text{ GPa}$ , skluz  $0\text{ }\%$ .



Obr. 5.22 Porovnání vypočtené predikční hodnoty pro tloušťku mazacího filmu s experimentálně naměřenými daty čistého a oxidačně degradovaného oleje EDGE 0W-20. Vlevo tlak 0,5 GPa, vpravo 0,7 GPa. Obě varianty obsahují data se skluzem 0, 50 a -50 %.

Z výsledků je možné vyvodit následující závěry. Prvním z nich je, že s rostoucí mírou degradace maziva nedochází, navzdory všem předpokladům, k poklesu tloušťky mazacího filmu, ale naopak k jejímu pozorovatelnému nárůstu (Obrázek 5.21).

Druhým závěrem je souvislost experimentálních dat s predikcí tloušťky mazacího filmu dle Hamrocka a Dowsona, a to taková, že při středních a vyšších valivých rychlostech se naměřené hodnoty velmi blíží hodnotám zmiňované predikce (Obrázek 5.21). Při malých rychlostech dochází k poklesu tloušťky filmu oproti predikci, na který může mít vliv zejména záběh zařízení.

Třetí získanou znalostí je rozdíl v hodnotách tloušťky filmu při změně tlaku v kontaktu (Obrázek 5.22). S navýšením tlaku o 0,2 GPa došlo ke snížení tloušťky filmu v rozmezí 3 až 10 nm, a to u čistého i degradovaného oleje. Čtvrtým poznatkem je, že změna skluzu má jenom nepatrný vliv na změnu tloušťky filmu za použitých podmínek měření.

V neposlední řadě byla tloušťka mazacího filmu změřena u čistého i degradovaného oleje EDGE 0W-20, který nevykazoval změny tloušťky filmu při nižším kontaktním tlaku. Ovšem při vyšším tlaku byl pozorovatelný pokles tloušťky filmu, a to až o 10 %. Tento pokles může mít spojitost s poklesem dynamické viskozity při větším smykovém namáhání.

I přesto, že tloušťka mazacího filmu nebyla příliš negativně ovlivněna, může dojít ke změně jiných parametrů, jako je například tření.

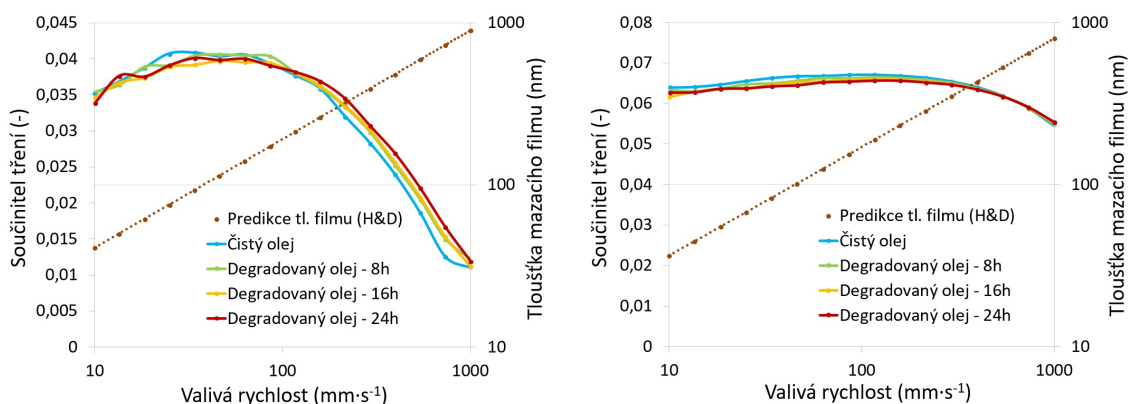
### 5.3.3 Vliv oxidačně degradovaného oleje na tření

Poslední sada výsledků se zabývá vlivem oxidační degradace na změnu tření. Na Obrázcích 5.23, 5.24 a 5.25 lze pozorovat následující závislosti.

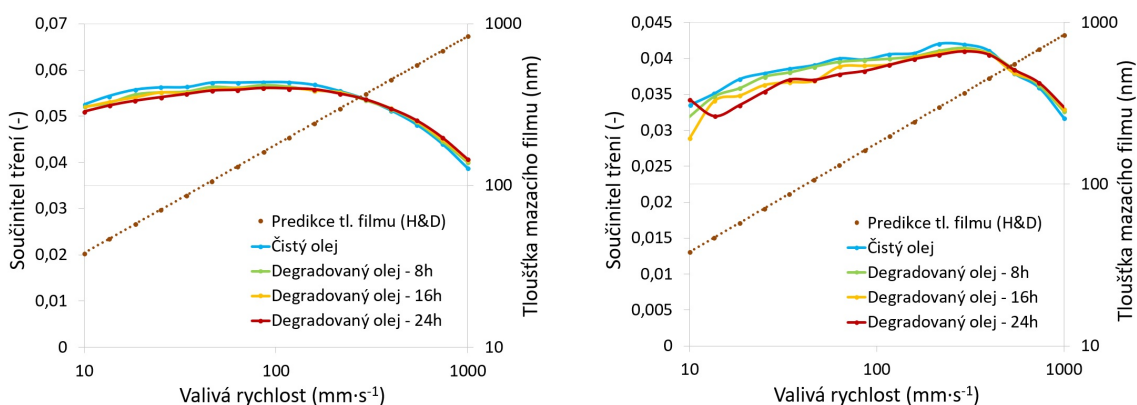
Pro zkoumání vlivu oxidační degradace na tření byl zvolen olej CLP 220, neboť se dle výsledků měření viskozity a tloušťky mazacího filmu jevil jako nejvhodnější zástupce. U naměřených dat lze pozorovat trend nárůstu tření s rostoucí mírou degradace maziva, a to zejména při středních a vyšších valivých rychlostech za kontaktního tlaku 0,5 GPa (Obrázek 5.23). S vyšší hodnotou tlaku dále dochází k vyrovnání hodnot tření při všech valivých rychlostech a stavech maziva.



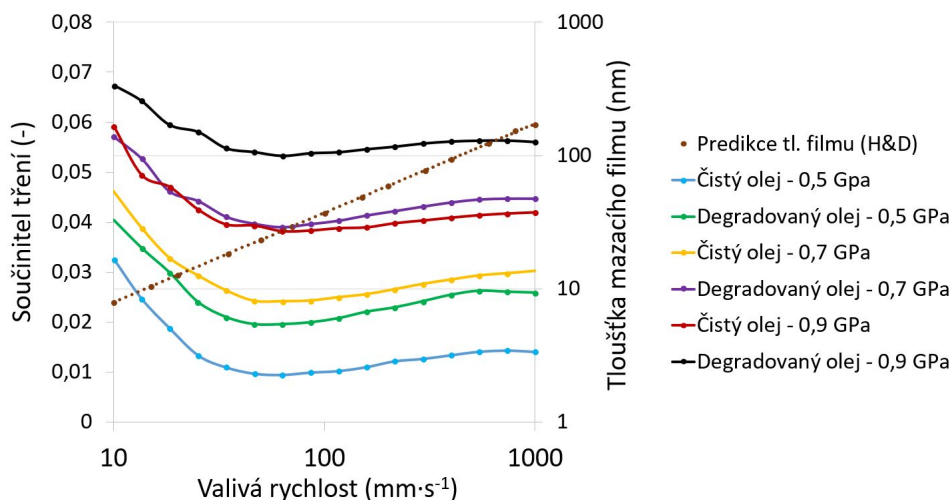
Zajímavé výsledky přineslo i měření s menší hodnotou skluzu (Obrázek 5.24), u kterého došlo při nižších valivých rychlostech k nepravidelnému průběhu tření a obecně k poklesu jeho hodnot.



Obr. 5.23 Porovnání tření čistého a degradovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. Vlevo tlak 0,5 GPa, vpravo 0,9 GPa.



Obr. 5.24 Porovnání tření čistého a degradovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. Tlak 0,7 GPa, skluz 20 % na levém obrázku a 5 % na pravém.



Obr. 5.25 Porovnání tření čistého a degradovaného oleje Castrol EDGE 0W-20 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. Tlak 0,5, 0,7 a 0,9 GPa se skluzem 20 %.

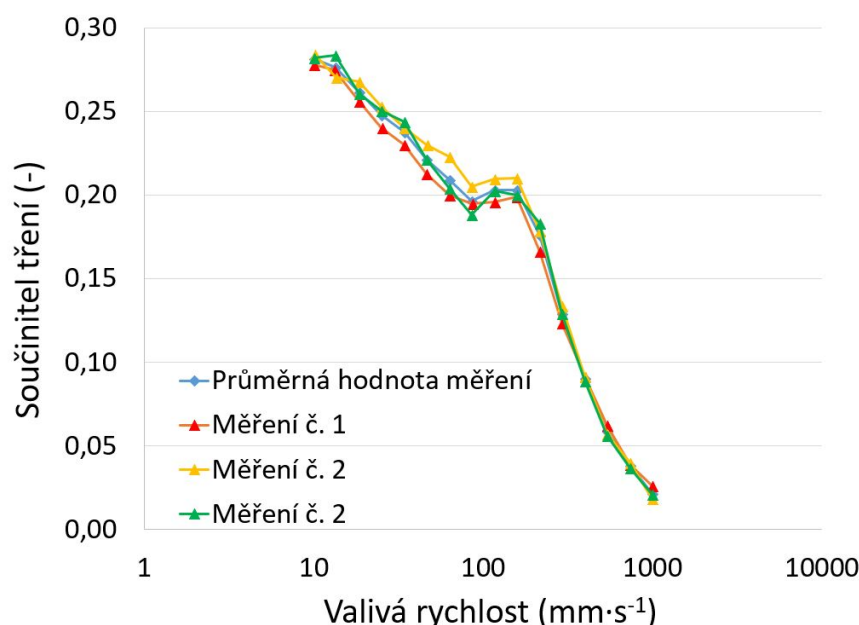


V neposlední řadě bylo provedeno měření tření pro olej Castrol Edge 0W-20. Na vyhodnocených datech lze pozorovat, že u všech naměřených tlaků došlo ke značnému rozdílu v hodnotách tření mezi čistým a degradovaným olejem, a to až o 83 %, . To je odůvodňováno neschopností degradovaného oleje plnit požadavky kladené na mazaný kontakt. V rámci měření tření byl pozorovatelný také nárůst teploty v kontaktu u degradovaných olejů oproti čistým, a to v rozmezí 2 až 4 °C.

Na základě změřených a vyhodnocených dat lze říci, že z hlediska úrovně degradace maziva byla metoda přípravy vzorků s vyšší teplotou a po delší dobu účinnější. I přesto, že všechny vzorky vykazovaly charakteristické zabarvení oleje, pouze u některých z nich se za určitých podmínek projeví negativní vlastnosti degradovaných maziv.

## 6 DISKUZE

Důležitým krokem v rámci této práce bylo sestavit plán experimentů, které by popsaly problematiku kontaminace a degradace maziva tak, aby bylo možné použít tato výsledná data v rámci vývoje proaktivního systému údržby. S ohledem na dostupnou literaturu a na cíle práce bylo snahou vyjít z normovaných postupů pro popis či přípravu vzorků, které byly dále testovány z hlediska únosnosti mazacího filmu a porovnávány s parametry získatelnými pomocí sofistikovaných diagnostických nástrojů. Následným krokem bylo stanovení vlivu míry kontaminace a degradace maziva na parametry mazaného uzlu, jako jsou tloušťka mazacího filmu či tření. Pro zajištění validity naměřených dat byly jednotlivé experimenty prováděny vícekrát a výsledky následně zprůměrovány. Dobré opakovatelnosti výsledků bylo docíleno u všech prováděných měření, přičemž ukázkou je Obrázek 6.1, na kterém je demonstrován průběh tření, naměřený pomocí tribometru MTM, u tří nezávislých měření za stejných vstupních podmínek a s nejvyšším kódem čistoty maziva.



**Obr. 6.1** Průběh tření u nezávislých měření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti  $40 \mu\text{m}$ . Kód čistoty maziva 21/21/21, tlak  $0,5 \text{ GPa}$ , skluz  $20 \%$ .

### 6.1 Vliv míry pevných částic na tření a opotřebení

Pro objasnění chování pevných kontaminačních částic v kontaktu mazaného uzlu byly použity částice korundu a železa o velikostech  $40 \mu\text{m}$ . Míra použitých částic respektovala standardy normy ISO 4406:1999, udávající úroveň čistoty maziva, v níž jednotlivé úrovně reprezentují počet částic obsažených v  $1 \text{ ml}$  oleje. Tento rozsah bylo nutné přepočítat na rozsah hmotností vycházejících z hustoty a objemu částic, přičemž výsledky jsou následující.

V Tabulce 6.1 lze jasně pozorovat vliv míry kontaminace maziva pevnými částicemi na tření v kontaktu. Uvedený procentuální nárůst tření při různých tlacích

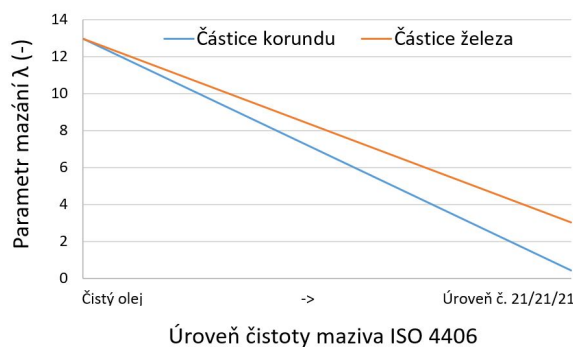
**Tab. 6.1** Vliv míry kontaminace maziva pevnými částicemi na tření v kontaktu.

Kód čistoty maziva FVA 3	Hmotnost částic v 1 ml (g)	Valivá rychlost (mm · s <sup>-1</sup> )	Změna tření (%)		
			0,5 GPa	0,7 GPa	0,9 GPa
18/18/18 (korund)	0,0002	158	168	40	18
		398	56	12	3
19/19/19 (korund)	0,0004	158	205	80	35
		398	90	22	5
20/20/20 (korund)	0,001	158	248	98	45
		398	92	31	9
21/21/21 (korund)	0,002	158	416	153	73
		398	164	55	18
18/18/18 (železo)	0,0004	116	15	-	-
		215	-	-	-
19/19/19 (železo)	0,001	116	35	2	-
		215	5	1	-
20/20/20 (železo)	0,002	116	73	10	2
		215	17	3	-
21/21/21 (železo)	0,004	116	146	23	5
		215	39	10	-

a rychlostech vychází vždy z porovnání kontaminovaného oleje oproti čistému. Poznatzky získané porovnáním naměřených hodnot tření jsou následující.

S nárůstem kódu čistoty maziva dochází k nárůstu tření v kontaktu, jehož hodnota naopak klesá s rostoucí rychlostí i tlakem (Tabulka 6.1). Je však nutné zmínit, že samotná hodnota tření se u čistého oleje při nárůstu kontaktního tlaku zvýšila. Ovšem při posuzování vlivu míry kontaminace maziva je tato informace nepodstatná a posuzuje se pouze relativní nárůst tření vzhledem k daným podmínkám měření, tj. v rámci jednotlivých kontaktních tlaků. Obecně je pokles tření s nárůstem tlaku odůvodňován obcházením částic okolo kontaktu.

Pro jednotlivé podmínky byl také vyhodnocen parametr mazání  $\lambda$ , který charakterizuje režim mazání a je definován jako poměr minimální tloušťky mazacího filmu k redukované drsnosti třecích povrchů. V případě kontaminace maziva pevnými částicemi dochází v kontaktní oblasti ke změně opotřebení, které vede k různé drsnosti povrchů pro různé úrovně kontaminace. Výsledky měření drsnosti povrchů po testech opotřebení jsou shrnuty v Tabulce 6.2.



**Obr. 6.2** Změna parametru mazání  $\lambda$  na základě nárůstu kódu čistoty maziva, ovlivňujícího drsnost povrchů kontaktních součástí. Použitá směs oleje FVA 3 s částicemi korundu o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Kód čistoty maziva 21/21/21, rychlost 398 mm/s, tlak 0,5 GPa, skluz 20 %.

**Tab. 6.2** Výsledné hodnoty drsnosti povrchů a míry opotřebení při kontaminaci částicemi železa a korundu o velikosti 40  $\mu\text{m}$ .

Kód čistoty maziva FVA 3	Valivá rychlost ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Drsnost povrchu Ra ( $\mu\text{m}$ )	Míra opotřebení ( $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ )
Čistý olej	210	0,015	$1,1 \cdot 10^{-9}$
Čistý olej	735	0,015	$1,7 \cdot 10^{-9}$
Čistý olej	1000	0,015	$1,0 \cdot 10^{-9}$
21/21/21 (korund)	210	0,43	$2,5 \cdot 10^{-6}$
21/21/21 (korund)	735	0,203	$8,3 \cdot 10^{-7}$
21/21/21 (korund)	1000	0,183	$7,3 \cdot 10^{-7}$
21/21/21 (železo)	150	0,065	$5,1 \cdot 10^{-8}$
21/21/21 (železo)	400	0,058	$1,6 \cdot 10^{-8}$
21/21/21 (železo)	1000	0,044	$8,1 \cdot 10^{-9}$

Na Obrázku 6.2 lze pozorovat změnu parametru  $\lambda$ , na kterém je patrné, že vlivem nárůstu kódu čistoty maziva dochází k poklesu tohoto parametru, neboť s rostoucí mírou kontaminace dochází k většímu opotřebení, a tudíž k větší změně drsnosti povrchu. Hodnota parametru  $\lambda$  při rychlosti 398  $\text{mm/s}$  je u čistého oleje **13**, s kódem čistoty maziva 21/21/21 s částicemi železa **3** a s částicemi korundu **0,52**. Důležitým poznatkem je, že vlivem kontaminace maziva dochází ke změně režimu mazání z hydrodynamického až na mezný, jež je podstatná z hlediska životnosti mazaného uzlu. Dále lze na základě hodnot drsnosti povrchu a míry opotřebení, uvedených v Tabulce 6.2, ověřit charakter opotřebení; u směsi s částicemi korundu došlo k odběru materiálu hrubým, abrazivním opotřebením, zatímco u směsi s částicemi železa k opotřebení adhezivnímu, u kterého lze pozorovat stopy po vytrhnutých částicích z kontaktu.

## 6.2 Vliv míry vlhkosti na parametry mazacího filmu

V rámci zkoumání vlivu kontaminace vlhkostí na parametry mazacího filmu se podařilo dosáhnout obdobných výsledků jako v pracích Bennera [13], Wana [14] či Koutného [16], a to zejména při popisu změny tloušťky mazacího filmu (Tabulka 6.3). Výsledky jsou takové, že vlivem kontaminace maziva nedochází k výrazné změně v tloušťce mazacího filmu, neboť obsažená voda do kontaktu přímo nevstupuje, ale má tendenci ho obcházet. Mimo jiné je pozorovatelný nárůst tření, avšak pouze při specifických podmínkách, a to při tlaku 0,5  $\text{GPa}$  a za vyšších valivých rychlostí, kolem rychlosti 735  $\text{mm/s}$ . Procentuální změny hodnot byly stanoveny stejným způsobem jako v předchozí kapitole, tedy porovnáváním stavu kontaminovaných olejů oproti čistým.

Dále je možné pozorovat (Tabulka 6.4) vliv vlhkosti na charakteristické a diagnostikovatelné parametry maziva, jako je viskozita či dielektrická konstanta. Za

**Tab. 6.3** Vliv kontaminace vlhkostí na změnu tloušťky mazacího filmu a tření.

Stav maziva CLP 220	Změna tl. mazacího filmu (%)		Změna tření (%)		
	0,5 $\text{GPa}$	0,7 $\text{GPa}$	0,5 $\text{GPa}$	0,7 $\text{GPa}$	0,9 $\text{GPa}$
Kontaminovaný – 8 h	<-3,5; 1>	<-4,5; 2>	17,7	-	-

**Tab. 6.4** Vliv kontaminace maziva vlhkostí na změnu dynamické, respektive kinematické viskozity a dielektrické konstanty.

Stav maziva CLP 220	Změna dyn. viskozity RotoVisco (%)	Změna kin. viskozity LubCos Vis+ (%)	Změna diel. konstanty (%)
Kontaminovaný – 8 h	0,03	10,1	31,8

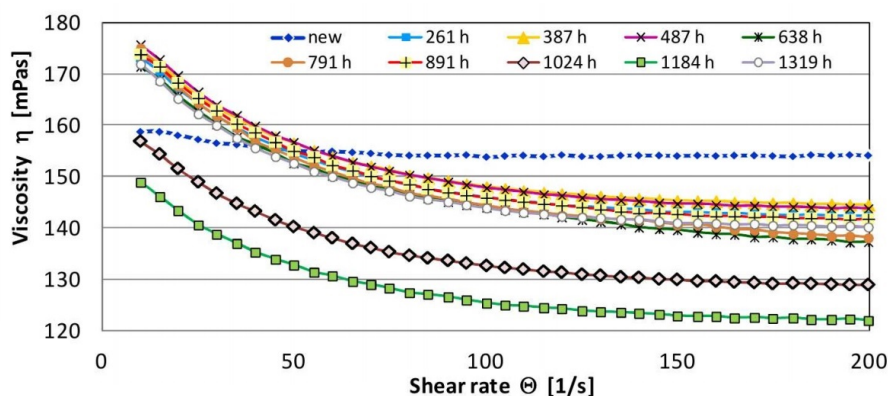
účelem dodržení stanovených cílů byla viskozita testována dvěma způsoby, a to pomocí zařízení RotoVisco, které vyhodnocuje dynamickou viskozitu, a dále pomocí senzoru LubCos Vis+, který udává kinematickou viskozitu a dielektrickou konstantu. Na vzorku se zastoupením relativní vlhkosti 100 % byla naměřena stejná dynamická viskozita (RotoVisco) jako u čistého oleje. Naproti tomu při měření pomocí senzoru došlo k nárůstu kinematické viskozity až o 10 % a změně dielektrické konstanty téměř o 32 %. Tento rozdíl je způsoben odlišným principem, na němž obě měřicí zařízení fungují a jenž je blíže popsán v kapitole věnované výsledkům. Doplňující informací je, že snímaná hodnota dielektrické konstanty, reagující na obsah vody v mazivu, vstupuje do algoritmu pro výpočet kinematické viskozity, čímž ji nepříznivě ovlivňuje a nepřesně vyhodnocuje výsledky.

### 6.3 Vliv míry oxidační degradace na chování mazacího filmu

Studiem vlivu míry oxidační degradace na parametry mazaného uzlu se dospělo k následujícím závislostem. V Tabulce 6.5 lze pozorovat změny dynamické a kinematické viskozity v důsledku prodlužování doby, po kterou byly oleje degradovány (Tabulka 6.5). U vzorků připravovaných modifikovanou metodou pro oxidační stabilitu maziva při 140 °C došlo u olejů CLP 220, SPECTRASYN 6 a INTRANS 220 k malému, ovšem pozorovatelnému nárůstu dynamické viskozity, která se promítla i do pozorovatelného nárůstu tloušťky mazacího filmu (Tabulka 6.6, Obrázek 5.21). K opačnému jevu došlo u základového oleje FVA 4, u kterého je pozorovatelný velmi

**Tab. 6.5** Porovnání oxidačně degradovaných olejů z pohledu změny dynamické, respektive kinematické viskozity a dielektrické konstanty.

Úroveň degradace maziva	Změna dyn. viskozity RotoVisco (%)	Změna kin. viskozity LubCos Vis+ (%)	Změna diel. konstanty (%)
CLP 220 – 8 h	8	12	23
CLP 220 – 16 h	7	13	26
CLP 220 – 24 h	6	15	26
FVA 4 – 8 h	-3	4	0,5
FVA 4 – 16 h	-1	4	1
FVA 4 – 24 h	-	4	0,5
SPECTRASYN 6 – 8 h	8	3	-1
SPECTRASYN 6 – 16 h	6	2	4
SPECTRASYN 6 – 24 h	5	-4	-1
INTRANS 220 – 8 h	2	4	-
INTRANS 220 – 16 h	2	11	-1
INTRANS 220 – 24 h	3	7	-1
EDGE 0W-20 – 96 h	-24	15	8



Obr. 6.3 Pokles dynamické viskozity u vzorků s vyšší mírou oxidační degradace [21].

Tab. 6.6 Závislosti tloušťky mazacího filmu a tření na míře degradovaného maziva.

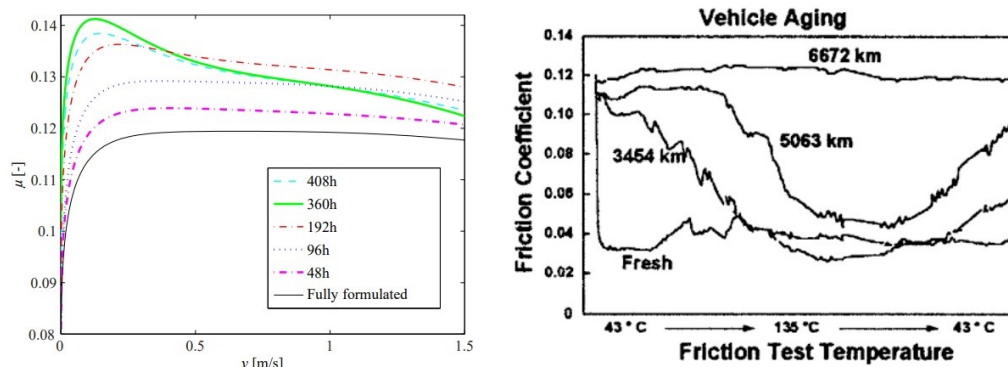
Úroveň degradace maziva	Změna tl. mazacího filmu (%)		Změna tření (%)		
	0,5 GPa	0,7 GPa	0,5 GPa	0,7 GPa	0,9 GPa
CLP 220 – 8 h	<5; 13>	<7; 15>	20	1	-
CLP 220 – 16 h	<0; 8>	<4; 15>	23	2	-
CLP 220 – 24 h	<5; 11>	<4; 15>	33	3	-
EDGE 0W-20 – 96 h	<0; 11>	<-10; 3>	83	50	35

malý pokles dynamické viskozity a s tím související pokles hodnoty tloušťky mazacího filmu (Obrázek 5.21). Tyto změny přirozeně nejsou dost velké na to, aby způsobily ovlivnění chování mazacího filmu. Změny hodnot dielektrické konstanty vlivem degradace maziva neměly jednoznačně popsitelný průběh, když ve většině případů měly nahodilý charakter, kolísající kolem určité hodnoty.

Výsledky pro olej připravovaný metodou pro oxidační stabilitu maziva při 160 °C po dobu 96 hodin mají zcela jiný charakter. U tohoto vzorku (EDGE 0W-20) lze pozorovat pokles dynamické viskozity i přesto, že kinematická viskozita vzrostla. Tento jev je odůvodňován neschopností maziva plně vykonávat svou funkci při smykovém zatěžování. Toto chování, které se podařilo popsat i v práci Sikory [21] (Obrázek 6.3), poukazuje na pokles dynamické viskozity s rostoucí mírou oxidační degradace maziva při smykovém zatěžování. Dále je pozorovatelný jistý pokles tloušťky mazacího filmu, a to zejména při nižších rychlostech, vyšším kontaktním tlaku a při záběhu zařízení (Tabulka 6.6). V rámci objasnění stavu degradovaného vzorku maziva EDGE 0W-20 byly naměřeny tyto parametry: oxidace 90 A/cm, pokles TBN až o 65 %, nárůst NN o 8,7 mg KOH/g.

Významnou roli při testování oxidační degradace sehrálo měření tření v kontaktu. V Tabulce 6.6 jsou uvedeny hodnoty tření pro degradované vzorky maziva EDGE 0W-20 a CLP 220, který byl zvolen jako zástupce degradovaných vzorků připravených modifikovanou metodou pro oxidační stabilitu maziva při 140 °C, neboť u ostatních vzorků bylo dosaženo podobných výsledků.

Na datech v Tabulce 6.6 lze pozorovat kontinuální nárůst hodnoty tření s rostoucí mírou degradace maziva. U vzorků maziv připravovaných za nižších teplot, v tomto případě olej CLP 220, obecně docházelo k ovlivnění tření zejména při nižším tlaku (0,5 GPa) a při středních a vyšších valivých rychlostech (Obrázek 5.23). Naproti tomu u vzorků připravovaných za vyšší teploty a po delší dobu (EDGE 0W-20)



Obr. 6.4 Nárůst tření vlivem různých úrovní oxidační degradace maziva. Obrázek vlevo pochází od Berglunda [23], obrázek vpravo od Korceka [43].

bylo dosaženo vyšší nárůstu tření, a to až o 83 % oproti čistému oleji. Tento rozdíl v hodnotách tření zároveň koreluje s rozdílnou dobou přípravy vzorků. Kvůli nedostatečnému laboratornímu vybavení se však vyšší doby přípravy u některých vzorků nepodařilo dosáhnout. Změna hodnoty součinitele tření vlivem oxidační degradace byla zkoumána Berglundem [23], Wangem [24] či Korcekem [43], přičemž tyto autoři dospěli ve svých pracích k podobným závěrům (Obrázek 6.4).



## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce shrnuje výsledky experimentální studie zabývající se kontaminací a degradací maziva. Jejím cílem bylo navrhnout, realizovat a vyhodnotit sérii experimentů, které by vhodně popsaly vliv kontaminace pevnými částicemi, kontaminace vlhkostí a degradace maziva na chování mazacího filmu s ohledem na limitní únosnost. Tato problematika byla rozvedena v několika kapitolách, ve kterých byly sepsány poznatky o přístupech a dosažených výsledcích týkajících se kontaminace a degradace maziva, jejichž závěry jsou následující.

Na kontaminaci pevnými částicemi lze pohlížet dvěma způsoby. Prvním z nich je předpoklad, že částice v kontaktu způsobují tlakové fluktuace, kdy s rostoucí velikostí částice se zvyšuje i napětí, které může vést ke vzniku důlku a později k rozvoji kontaktní únavy. Druhým je přístup popisující vliv pevných částic na vznikající tření a opotřebení v kontaktu, kterým se tato práce primárně zabývala. Experimenty byly prováděny na tribometru MTM s následnou kontrolou povrchu pomocí 3D optického profilometru. Použité vzorky reprezentovaly různé kódy čistoty maziva dle normy ISO 4406, které se v praxi běžně vyskytují. Z výsledků je patrný trend kontinuálního nárůstu tření s rostoucím kódem čistoty maziva, a to až o 400 %, zejména při rychlostech od 0 do  $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Hodnoty tření i opotřebení následně klesají s rostoucím kontaktním tlakem, což je důsledek toho, že částice při vyšším tlaku do kontaktu nevstupují. Dále je pozorovatelný rozdílný charakter opotřebení, když u částic korundu docházelo k většímu hrubému, abrazivnímu opotřebení, zatímco u částic železa k jednoznačně menšímu adhezivnímu opotřebení.

Kontaminace vlhkostí je v praxi častým problémem, neboť může mít neblahý efekt na chování mazacího filmu. Experimentální studie se tímto problémem zabývaly z pohledu obsažené vody v oleji, nicméně vliv těchto emulzí např. na tloušťku mazacího filmu nebyl patrný, neboť se podařilo zpozorovat, že kapičky vody do kontaktu nevstupují, nýbrž že mají tendenci ho obcházet. V rámci této diplomové práce bylo ke kontaminaci vlhkostí přistoupeno jiným způsobem. Reprezentativní vzorek byl vytvořen sycením povrchu oleje vlhkými parami za jeho stálého ohřevu, dokud nebylo dosaženo relativní vlhkosti 100 %. Následně byly u tohoto vzorku testovány viskozita (dvěma způsoby), tloušťka mazacího filmu a tření. U dynamické viskozity, měřené na reometru RotoVisco, nedošlo ke změně hodnot, ovšem u kinematické viskozity, získané pomocí senzoru LubCos Vis+, byl zaznamenán 10% nárůst. Tato změna má souvislost s principem, na němž vyhodnocovací zařízení fungují, přičemž tento problém je blíže specifikován v kapitole věnované výsledkům. Obdobně jako u ostatních studií se u tohoto vzorku nepodařilo prokázat vliv na změnu tloušťky mazacího filmu, ale byl zaznamenán nárůst tření, při určitých podmínkách až o 17 %.

K degradaci maziva lze přistupovat třemi způsoby. Prvním z nich je mechanická degradace, kterou se podařilo popsat v rámci řešeršní části práce, z níž vyplynula její nezávislost na změně chování mazacího filmu. Druhým přístupem je tepelná degradace, která slouží pouze k urychlování oxidační degradace, jež se řídí Arrheniovým pravidlem. To říká, že s každým nárůstem teploty o  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se rychlost oxidace zdvojnásobí. Posledním přístupem je oxidační degradace, která spočívá v reakci kyslíku s daným materiálem. Z důvodu nedostatku literatury zabývající se tímto tématem byl v této diplomové práci sestaven plán experimentů pro jeho detailnější popsání.

Pomocí modifikované metody pro oxidační stabilitu maziva, spočívající v zahřívání vzorku maziva při teplotě 140 nebo 160 °C za stálého probublávání vzduchem, byla vytvořena řada vzorků, degradovaných po různých časových intervalech. Testovanými vzorky byly oleje minerální, syntetické, základové či plně aditivované. Na výsledcích se nepodařilo prokázat zásadní vliv na změnu tloušťky mazacího filmu, ovšem jistý trend pozorovatelný je. Naopak významný vliv měla oxidační degradace na vznikající tření v kontaktu, které se zvyšovalo s rostoucí mírou degradovaného maziva, přičemž maximální nárůst tření (až o 83 % oproti čistému oleji) byl zaznamenán u oleje EDGE 0W-20, který byl degradován po dobu 96 hodin a reprezentoval stav oleje v automobilu po 33 000 km jízdy.

V rámci dalšího studia a výzkumu v oblasti kontaminace pevnými částicemi by bylo vhodné doplnit stávající řešení o vliv částic z různých materiálů a různé tvrdosti, např. částic křemíku. Kontaminace vlhkostí by mohla být dále zkoumána z hlediska tření, a to při různém obsahu vody a různých provozních podmínkách.

Problematika oxidační degradace je velice komplexní záležitost. Ve výsledcích bylo možné pozorovat jisté vlivy na chování mazacího filmu, které mohou být z hlediska životnosti strojních součástí klíčové. Ovšem pro její kompletní popsání by bylo nutné provést experimenty při vyšších teplotách a po delší dobu degradace, díky čemuž by bylo možné lépe stanovit stav oleje pomocí veličin, jako je dielektrická konstanta apod.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SKF Group. *Řešení otázek mazání od společnosti SKF* [online]. 2009 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: [http://www.skf.com/binary/tcm:12-152647/6917\\_C-S\\_6\\_-HI.pdf](http://www.skf.com/binary/tcm:12-152647/6917_C-S_6_-HI.pdf)
- [2] HARTL, M. *Velmi tenké elastohydrodynamické mazací filmy*. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2005. ISBN 80-214-3059-1
- [3] MAATALLAH, S., SARI, M. R. a L. KHOCHEMANE. Effect of Lubricant Contamination on EHL Rolling Contact: Response Surface Methodology. *Engineering Transactions*. 2016, vol. 64, no.1 , s. 69-88. ISSN 2450-8071.
- [4] KANETA, M., KANADA, T. a H. NISHIKAWA. Optical Interferometric Observations of the Effects of a Moving Dent on Point Contact EHL. *Elastohydrodynamics '96*. 1997, vol. 32, no. 1, s. 69-79. ISBN 04-448-2809-5
- [5] JACKSON, A. a A. CAMERON. An Interferometric Study of the EHL of Rough Surfaces. *ASLE transactions*. 1976, vol. 19, no. 1, s. 50-60. ISSN 0569-8197
- [6] WEDEVEN, LAVERN D. Influence of Debris Dent on EHD Lubrication. *ASLE Transactions*. 1978, vol 21, no. 1, s. 41-52. ISSN 0569-8197
- [7] WEDEVEN, L. D. a C. CUSANO. Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surface dents and groove. *ASLE Transactions*. 1979, vol. 22, no. 4, s. 369-381. ISSN 0569-8197
- [8] CUSANO, C. a L. D. WEDEVEN. Elastohydrodynamic Film Thickness Measurements of Artificially Produced Nonsmooth Surfaces. *ASLE transactions*. 1981, vol. 24, no. 1, s. 1-14. ISSN 0569-8197
- [9] CUSANO, C. a L. D. WEDEVEN. The Influence of Surface Dents and Grooves on Traction in Sliding EHD Point Contacts. *ASLE Transactions*. 1982, vol. 26, no. 3, s. 306-310. ISSN 0569-8197
- [10] KANETA, M. a A. CAMERON. Effects of Asperities in Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Lubrication Technology*. 1980, vol. 102, no. 3, s. 374-378. ISSN 0022-2305
- [11] SARI, M. R., HAIAHEM A. a L. FLAMAND. Effect of Lubricant Contamination on Gear Wear. *Tribology Letters*. 2007, vol. 27, no. 1, s. 119-126. ISSN 1023-888305
- [12] KANG, Y. S., SADEGHI F. a X. AI. Debris Effects on EHL Contact. *Journal of Lubrication Technology*. 2000, vol. 122, no. 4, s. 711-720. ISSN 0742-4787
- [13] BENNER, J. J., SADEGHI, F., HOEPRICH, M. R. a M. C. FRANK. Lubricating Properties of Water in Oil Emulsions. *Journal of Tribology*. 2006, vol. 128, no. 2, s. 296-311. ISSN 0742-4787

- [14] WAN, G. T. Y., KENNY, P. a H. A. SPIKES. Elastohydrodynamic properties of water-based fire-resistant hydraulic fluids. *Tribology International*. 1984, vol. 17, no. 6, s. 309-315. DOI: 10.1016/0301-679X(84)90093-8
- [15] ZHU, D., BIRESAW, G., CLARK, J. a T. KASUN. Elastohydrodynamics Lubrication With O/W Emulsions. *Transactions of the ASME*. 1994, vol. 116, no. 2, s. 310-320. DOI: 10.1115/1.2927216.
- [16] KOUTNÝ, D. *Experimentální studium chování mazacích filmů kontaminovaných vodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2008. 80 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [17] MANG, T. a W. DRESEL. Lubricants and Lubrication. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*. 2007. ISBN 9783527645565
- [18] LIVINGSTONE, G., WOOTON, D. a B. THOMPSON. Finding the Root Causes of Oil Degradation. *Practicing Oil Analysis*. 2007. Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/989/fluid-degradation-causes>
- [19] MAGUIRE, E. *Monitoring of Lubricant Degradation with RULER and MPC*. Linköping: Linköping University, Department of Physics, Chemistry and Biology. 2010. 63 s. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:328033/FULLTEXT01.pdf>
- [20] HÖHN, B. R. a K. MICHAELIS. *Influence of Lubricant Ageing on Gear Performance* [online]. Gear Research Centre FZG, Technische Universität München. 2001 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: [http://www.oetg.at/fileadmin/Dokumente/oetg/Proceedings/WTC\\_2001\\_files/html/M-28-02-339-HOEHN.pdf](http://www.oetg.at/fileadmin/Dokumente/oetg/Proceedings/WTC_2001_files/html/M-28-02-339-HOEHN.pdf)
- [21] SIKORA, G. a A. MISZCZAK. The Influence of Oil Ageing on the Change of Viscosity and Lubricity of Engine Oil. *Solid State Phenomena*. 2013, vol. 199, no. 1, s. 182-187. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.199.182>
- [22] KEW ENGINEERING. *Oil Aging and Degradation: Why do I need to change the oil?* [online]. 2009 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: [http://www.kewengineering.co.uk/Auto\\_oils/oil\\_degradation.htm](http://www.kewengineering.co.uk/Auto_oils/oil_degradation.htm)
- [23] BERGLUND, K. *Lubricant ageing effects on wet clutch friction characteristics*. Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. 2008. 54 s. ISSN: 1402-1617
- [24] WANG, L., WANG, L., LI, G. a X. XU. Effect of Ash-Less Antioxidants on Fuel Efficiency Retention of PCMO Containing MoDTC. *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. 2012, vol. 1, no. 1, s. 483-491. DOI: 10.1007/978-3-642-33841-0\_36
- [25] BAIR, S., KRUPKA, I., SPERKA, P. a M. HARTL. Quantitative elastohydrodynamic film thickness of mechanically degraded oil. *Tribology International*. 2013, vol. 64, no. 8, s. 33-38. ISSN 0301-679X

- [26] HABCHI, W., BAIR, S., QURESHI, F. a M. COVITCH. A Film Thickness Correction Formula for Double-Newtonian Shear-Thinning in Rolling EHL Circular Contacts. *Tribology Letters*. 2013, vol. 50, no. 1, s. 59-66. ISSN 1023-8883
- [27] ZAPLETAL, T. *Vliv povrchových rýh na přechod ke smíšenému mazání* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojího inženýrství, 2016 [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/59051?show=full>
- [28] ZIMMERMAN, M. *Chování EHD mazacího filmu při náhlých změnách rychlosti a zatížení* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojího inženýrství, 2011 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/6797>
- [29] THERMOFISHER. HAAKE RotoVisco 1 Rotational Rheometer [online]. 2017 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/376-0001>
- [30] SIGMA-ALDRICH. Thermo Haake compact refrigerated circulator C/DC class [online]. 2017 [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/z321648?lang=en&region=CZ>
- [31] NETME. Laboratoř tribologie [online]. 2017 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/tribology-laboratory/>
- [32] SPERKA, P. *3D optický profilometr pro mapování inženýrských povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2007. 83 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. Dostupné z: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=308](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=308)
- [33] BRUKER. *ContourGT-X* [online]. 2017 [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/3d-optical-microscopes/contourgt-x/learn-more.html>
- [34] PCS INSTRUMENTS. *MTM (Mini Traction Machine)* [online]. 2017 [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: <http://pcs-instruments.com/product/mtm-mini-traction-machine/>
- [35] ARGO HYTOS. LubCos H<sub>2</sub>O+ II Průběžné monitorování stavu oleje [online]. 2017 [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: [http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user\\_upload/Katalog\\_LubCosH2O\\_II\\_CZ.pdf](http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Katalog_LubCosH2O_II_CZ.pdf)
- [36] HY-PRO FILTRATION. *Understanding ISO Codes* [online]. 2017 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://www.hyprofiltration.com/clientuploads/directory/-Knowledge/PDFs/ISO%20Intro.pdf>
- [37] SIGMA-ALDRICH. *Iron 209309* [online]. 2017 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/209309?lang=en&region=CZ>
- [38] UNI-MAX. *Abrazivní materiál P280 - 1 kg* [online]. 2017 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <https://www.uni-max.cz/abrazivni-material-p280-1-kg/d/>

- [39] BESSER, C., SCHNEIDHOFER, C. a N. DÖRR. Investigation of long-term engine oil performance using lab-based artificial ageing illustrated by the impact of ethanol as fuel component. *Tribology International*. 2012, vol. 46, no. 1, s. 174-182. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.06.026
- [40] GOLD, P. W., SCHMIDT, A., DICKE, H. a J. LOOS. *Viscosity-Pressure-Temperature Behaviour of Mineral and Synthetic Oils*. Institute for Machine Elements and Machine Design, Technical University of Aachen, Germany. *J. Synthetic Lubrication*. 2001, vol. 18, no.1, s. 51-79. ISSN 0265-6582
- [41] AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. *AGMA 925-A03 - Effect of Lubrication on Gear Surface Distress*. United States - Virginia, 2013. ISBN 1-55589-815-7
- [42] ARGO HYTOS. *Operating Manual, Oil Condition Sensors - LubCos Vis+* [online]. 2017 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: [http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user\\_upload/Manual\\_V1.07.16\\_LubCos\\_Vis\\_\\_EN.pdf](http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Manual_V1.07.16_LubCos_Vis__EN.pdf)
- [43] KORCEK, S. Engine Oil Fuel Efficiency - Practical Issues. *Tribology for Energy Conservation*. 1998, vol. 34, no. 1, s. 25-33. ISBN 0-444-50033-2

## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

1.1	Ukázka tribologických uzlů (označených žlutě) u větrných elektráren [1].	11
2.1	Vliv umístění povrchové nerovnosti (vpravo) na tloušťku mazacího filmu (vlevo) [6].	13
2.2	Mikrofotografie rýhy orientované kolmo k toku (vpravo) a její závislost na tloušťce mazacího filmu (vlevo) [7].	13
2.3	Mikrofotografie rýhy orientované rovnoběžně s tokem (vpravo) a její závislost na tloušťce mazacího filmu (vlevo) [7].	14
2.4	Změna tloušťky mazacího filmu (vpravo) vzhledem k poloze a počtu rýh (vlevo) [8].	14
2.5	Vliv relativní tažné síly a velikosti, respektive pozicí vady na tloušťku mazacího filmu [9].	14
2.6	Na obrázku A je možné vidět profil rozložení tlaku v závislosti na velikosti částice. Na B – profil tloušťky filmu podél středové osy kontaktu, C – schéma mazaného kontaktu s kontaminační částicí, D – tlakový profil, E – profil tloušťky mezního kontaktu [12].	15
2.7	Vliv znečištění maziva na vývoj povrchového opotřebení v závislosti na čase [3].	16
2.8	Vliv znečištění maziva na vývoj teploty v závislosti na čase [3].	16
2.9	Jednotlivé podmínky pro různé kombinace provozních parametrů [3].	17
2.10	Ztráta tloušťky materiálu v různých místech pastorku [11].	17
2.11	Vývoj teploty u čistého a kontaminovaného oleje v ozubeném soukolí [11].	17
2.12	Na levém obrázku lze pozorovat závislost fáz. přechodu mezi emulzí oleje ve vodě a vodě v oleji na koncentraci oleje. Na pravém obrázku rozložení velikosti částic v emulzích [17].	18
2.13	Vlevo - experimentální interferogramy získané při rychlosti 1 m/s, se zatížením 0,38 GPa, 0,54 GPa a 0,7 GPa při čistém valení. Vpravo - porovnání experimentálních a analytických výsledků tloušťky mazacího filmu při čistém valení [13].	19
2.14	Náčrt inverze fází ve vstupní oblasti kontaktu [15].	19
2.15	Změna tloušťky filmu vlivem kontaminace maziva [14].	19
2.16	Pohyb vodní kapičky ve vstupní a okolní oblasti kontaktu pro olej HPO 100 [16].	20
2.17	Změna parametrů maziva s nárůstem degradace maziva [22].	20
2.18	Změna viskozity s nárůstem jeho degradace [22].	21
2.19	Porovnání olejů typu B (vlevo) a C (vpravo) vzhledem k jejich oxidačnímu indexu a uplynulému času [19].	21
2.20	Porovnání čísla kyselosti u olejů typu B (vlevo) a C (vpravo) vzhledem k uplynulému času [19].	22
2.21	Nárůst tření vlivem oxidační degradace maziva [24].	22
2.22	Nárůst tření vlivem oxidační degradace maziva [23].	22
2.23	Porovnání smykových závislostí viskozity u nového a použitého oleje [25].	23



2.24	Naměřená centrální tloušťka filmu při 60 °C pro nový a použitý olej včetně predikcí. Newtonova předpověď pro nový olej je taktéž pro porovnání znázorněna [25]. . . . .	24
2.25	Naměřená minimální tloušťka filmu při 60 °C pro nový a použitý olej včetně predikcí. Newtonova předpověď pro nový olej je taktéž pro porovnání znázorněna [25]. . . . .	24
4.1	Optický tribometr na Ústavu konstruování. . . . .	27
4.2	Znázornění principu optické interferometrie [27]. . . . .	28
4.3	Zařízení Mini Traction Machine (MTM) [34]. . . . .	28
4.4	Rotační reometr RotoVisco [29] a temperační jednotka Haake 41 [30].	29
4.5	3D optický profilometr Contour GT-X [33]. . . . .	30
4.6	Senzor stavu oleje LubCos Vis+ a H2O+ II [35]. . . . .	31
4.7	Ukázka normy ISO 4406:1999 [36]. . . . .	32
4.8	Postup přípravy vzorků modifikovanou metodou pro oxidační stabilitu maziva [39]. . . . .	33
4.9	Vývojový diagram při řešení kontaminace pevnými částicemi. . . . .	34
4.10	Vývojový diagram při řešení kontaminace vlhkostí. . . . .	35
4.11	Vývojový diagram při řešení degradace maziva. . . . .	36
5.1	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Tlak <b>0,5 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> . . . . .	37
5.2	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Tlak <b>0,7 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> . . . . .	38
5.3	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Tlak <b>0,9 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> . . . . .	38
5.4	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Tlak <b>0,7 GPa</b> , skluz <b>5 %</b> . . . . .	39
5.5	Pohled na profil a řez opotřebeného povrchu disku pro čistý olej za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnižší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo. . . . .	40
5.6	Pohled na profil a řez opotřebeného povrchu disku pro kontaminovaný olej s částicemi korundu (kód čistoty maziva 21/21/21) za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnižší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo. . . . .	40
5.7	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem, doplněný o závislost na opotřebení. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Tlak <b>0,7 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> , kód čistoty 21/21/21. . . . .	41
5.8	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic železa o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Skluz <b>20 %</b> . Vlevo tlak <b>0,5 GPa</b> , vpravo tlak <b>0,9 GPa</b> . . . . .	41
5.9	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic železa o velikosti 40 $\mu\text{m}$ . Tlak <b>0,7 GPa</b> . Vlevo skluz <b>20 %</b> , vpravo skluz <b>5 %</b> . . . . .	42
5.10	Pohled na profil a řez opotřebeného povrchu disku pro olej kontaminovaný částicemi korundu (kód čistoty maziva 21/21/21) za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnižší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo. . . . .	42

5.11	Pohled na profil a řez opotřeбенého povrchu disku pro olej kontaminovaný s částicemi železa (kód čistoty maziva 21/21/21) za podmínek uvedených v Tabulce 5.1. Nejnižší rychlost je na obrázku vlevo a nejvyšší vpravo. . . . .	43
5.12	Průběh tření mezi ocelovou kuličkou a diskem, doplněný o závislost na opotřeбенí. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti 40 $\mu m$ . Tlak <b>0,7 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> , kód čistoty 21/21/21. . . . .	43
5.13	Porovnání čistého (vlevo) a kontaminovaného (vpravo) oleje vlhkostí (CLP 220). . . . .	44
5.14	Porovnání naměřené viskozity a dielektrické konstanty pro čistý olej a olej kontaminovaný vlhkostí. Stav 1 – čistý olej, stav 2 – kontaminovaný olej, viz Obrázek 5.13. . . . .	45
5.15	Průběh experimentálně naměřených hodnot tloušťky mazacího filmu pro čistý olej a olej kontaminovaný vlhkým vzduchem. Hodnoty byly porovnány s predikcí dle Hamrocka a Dowsona. Pro graf vlevo platí podmínky tlaku <b>0,5 GPa</b> , skluz <b>0 %</b> a vpravo tlak <b>0,7 GPa</b> , skluz <b>0 %</b> . . . . .	46
5.16	Porovnání tření čistého a kontaminovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. V grafu je uveden průběh tření při tlaku <b>0,5</b> a <b>0,9 GPa</b> za skluzu <b>20 %</b> . . . . .	46
5.17	Porovnání tření čistého a kontaminovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. V grafu je uveden průběh tření při tlaku <b>0,7 GPa</b> a skluzu <b>5</b> a <b>20 %</b> . . . . .	47
5.18	Ukázka čistých a oxidačně degradovaných olejů, seřazených dle doby, po kterou maziva podléhala oxidační degradaci. Zleva jsou postupně zobrazeny vzorky maziva CLP 220, FVA 4, SPECTRASYN 6 a INTRANS 220. . . . .	47
5.19	Porovnání viskozity a dielektrické konstanty čistých a oxidačně degradovaných olejů (CLP 220, INTRANS 220, FVA 4 a SPECTRASYN 6). Stav 1 – čistý olej, stav 2 – po 8 hod. degradace, stav 3 – po 16 hod. degradace, stav 4 – po 24 hod. degradace. . . . .	48
5.20	Porovnání čistého a degradovaného oleje EDGE 0W-20 z hlediska viskozity a dielektrické konstanty. Stav 1 – čistý olej, stav 2 – po 96 hod. degradace. . . . .	48
5.21	Porovnání vypočtené predikční hodnoty pro tloušťku mazacího filmu s experimentálně naměřenými daty čistého a oxidačně degradovaného oleje CLP 220, FVA 4, SPECTRASYN 6 a INTRANS 220. Tlak <b>0,5 GPa</b> , skluz <b>0 %</b> . . . . .	49
5.22	Porovnání vypočtené predikční hodnoty pro tloušťku mazacího filmu s experimentálně naměřenými daty čistého a oxidačně degradovaného oleje EDGE 0W-20. Vlevo tlak <b>0,5 GPa</b> , vpravo <b>0,7 GPa</b> . Obě varianty obsahují data se skluzem <b>0</b> , <b>50</b> a <b>-50 %</b> . . . . .	50
5.23	Porovnání tření čistého a degradovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. Vlevo tlak <b>0,5 GPa</b> , vpravo <b>0,9 GPa</b> . . . . .	51

5.24	Porovnání tření čistého a degradovaného oleje CLP 220 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. Tlak <b>0,7 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> na levém obrázku a <b>5 %</b> na pravém. . . . .	51
5.25	Porovnání tření čistého a degradovaného oleje Castrol EDGE 0W-20 s vypočtenou predikční hodnotou tloušťky mazacího filmu. Tlak <b>0,5, 0,7 a 0,9 GPa</b> se skluzem <b>20 %</b> . . . . .	51
6.1	Průběh tření u nezávislých měření mezi ocelovou kuličkou a diskem. Směs oleje FVA 3 a částic korundu o velikosti <b>40 μm</b> . Kód čistoty maziva <b>21/21/21</b> , tlak <b>0,5 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> . . . . .	53
6.2	Změna parametrů mazání $\lambda$ na základě nárůstu kódu čistoty maziva, ovlivňujícího drsnost povrchů kontaktních součástí. Použitá směs oleje FVA 3 s částicemi korundu o velikosti <b>40 μm</b> . Kód čistoty maziva <b>21/21/21</b> , rychlost <b>398 mm/s</b> , tlak <b>0,5 GPa</b> , skluz <b>20 %</b> . . . . .	54
6.3	Pokles dynamické viskozity u vzorků s vyšší mírou oxidační degradace [21]. . . . .	57
6.4	Nárůst tření vlivem různých úrovní oxidační degradace maziva. Obrázek vlevo pochází od Berglunda [23], obrázek vpravo od Korceka [43]. . . . .	58

## SEZNAM TABULEK

4.1	Technické parametry optického tribometru [31]. . . . .	28
4.2	Technické parametry Mini Traction Machine (MTM) [31]. . . . .	29
4.3	Parametry reometru RotoVisco od firmy HAAKE [29]. . . . .	29
4.4	Technické parametry 3D optického profilometru Contour GT-X [31]. .	30
4.5	Technické parametry snímače stavu oleje LubCos. [35] . . . . .	31
4.6	Seznam použitých olejů s jejich reologickými vlastnostmi. . . . .	31
4.7	Počet a hmotnost železných částic dle ISO 4406:1999. . . . .	32
4.8	Počet a hmotnost korundových částic dle ISO 4406:1999. . . . .	32
4.9	Vstupní parametry pro měření tření v kontaktu. . . . .	34
4.10	Vstupní parametry pro měření opotřebení na tribometru MTM. . . .	34
4.11	Sekvenční rychlosti olejů CLP 220, FVA 4, Spectrasyn 6, Intrans 220 a EDGE 0W-20. . . . .	35
5.1	Podmínky pro měření opotřebení s uvedením výsledných hodnot (čas- tice korundu). . . . .	39
5.2	Podmínky pro měření opotřebení s uvedením výsledných hodnot (čas- tice železa). . . . .	43
6.1	Vliv míry kontaminace maziva pevnými částicemi na tření v kontaktu. .	54
6.2	Výsledné hodnoty drsnosti povrchů a míry opotřebení při kontaminaci částicemi železa a korundu o velikosti 40 $\mu m$ . . . . .	55
6.3	Vliv kontaminace vlhkostí na změnu tloušťky mazacího filmu a tření. .	55
6.4	Vliv kontaminace maziva vlhkostí na změnu dynamické, respektive kinematické viskozity a dielektrické konstanty. . . . .	56
6.5	Porovnání oxidačně degradovaných olejů z pohledu změny dynamické, respektive kinematické viskozity a dielektrické konstanty. . . . .	56
6.6	Závislosti tloušťky mazacího filmu a tření na míře degradovaného ma- ziva. . . . .	57

## SEZNAM PŘÍLOH

[1] Publikace výsledků ve sborníku ze 13. Mezinárodní Česko-Slovenské konference tribotechniky, pořádané Českou strojnickou společností:

OMASTA, M., STRNAD, J., HARTL, M. a I. KŘUPKA. Využití monitoringu stavu maziva pro hodnocení chování mazaného uzlu. In: *Mazání v moderním průmyslovém podniku 25. – 27. dubna 2018*. Praha: Česká strojnická společnost z.s., 2018, s. 19-23. ISBN 978-80-02-02785-0